

題名	好奇心にあふれた我が人生
Title	Curiosity as a Career
著者名	ユージン・ニューマン・パーカー
Author(s)	Eugene Newman Parker
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	19
受賞年度	2003
出版者	財団法人 稲盛財団
Publisher	Inamori Foundation
発行日 Issue Date	11/10/2004
開始ページ Start page	128
終了ページ End page	173
ISBN	978-4-900663-19-0

好奇心にあふれた我が人生

ユージン・ニューマン・パーカー

物心がついた頃から、好奇心を満足させることが私の人生の喜びでした。この世界は、物理学上の単純な概念をもってすれば理解可能な、不思議で魅力的な現象にあふれています。さらに申し上げれば、解明を待つ数々の謎の存在に気付くことも喜びです。

5歳の頃、私はニューヨーク州バッファローの郊外に住んでいましたが、自宅から2ブロック先に、汽車が頻繁に出入りする操車場がありました。その蒸気機関車や列車に私は心を奪われ、蒸気機関車がどうやって動くのかを知りたくなりました。また、てんてつ転轍器（ポイント）はどうやって動くのだろう、どのようにして蒸気機関車とそれに続く車両を別の線路に導いているのかということも知りたくなりました。航空技術者だった父は、押したり引いたりなど動作を交えて平易に説明してくれ、わくわくしながら父の話を聞いていました。

次なる疑問は、内燃機関はどのように動くのだろう、ということでした。木を使って内燃機関を作ってみようなどという、とんでもないことを考えて悦に入っていたのですが、手先が器用でなかったためにあきらめざるをえませんでした。

飛行機はなぜ空を飛ぶのでしょうか。音とは何でしょう。私は、空き缶で糸電話を作って遊びました。2つの空き缶の底の真ん中を1本の糸でつなぎ、その糸をびんと張るのです。空き缶に向かって何かしゃべると、音の振動が糸の振動に変わって相手方に伝わり、もう一方の空き缶で再び音に変わるのです。

この世の不思議は尽きることがありません。湖面に波が立つと、水の分子同士は継続的に擦れあうのに、なぜ摩滅しないのでしょうか。雨粒が岩の表面に当たっても、なぜ水の分子は壊れないのでしょうか。

私の父は、コンソリデートッド・エアークラフト社に勤めていました。私には、1歳半年下の妹と3歳年下の弟がいました。母が私たち兄弟の面倒を見てくれていましたが、夜になると父も私たちの相手をしてくれました。時々私たち家族は、ナイアガラ瀑布の下流にある深い峡谷に出かけました。そこは、急流の浸食作用で幾層にも重なった石灰岩の地層が100メートルの深さまでむき出しになっていました。その様子から、何百万年前という、人類がこの世に登場するはるか以前に、石灰岩が浅い海の底に堆積したことを知りました。その時の驚きといたらありませんでした。はるか昔は、一体どんな様子だったのだろうと思いをめぐらせました。

6歳になると、私は倍率50倍の顕微鏡を買ってもらいました。近くの池から採取した水の一滴を顕微鏡で覗いた私は、その生き生きとしたミクロの世界にすっかり魅せ

Curiosity as a Career

Eugene Newman Parker

Indulging my curiosity has been a gratifying theme in my life since my earliest memories of childhood. The world is mysterious and fascinating, filled with marvelous things that are understandable in terms of simple physical concepts. And I should add, it is gratifying to know that there are still many mysteries waiting for explanation.

When I was about five years old, I lived in a suburb of Buffalo, New York about two blocks from a busy railroad yard. The coming and going of the locomotives and train cars fascinated me, and I wanted to know how a steam locomotive worked. Then, how did a switch work, shunting the locomotive and its cars from one track to another? My father, who was an aeronautical engineer, provided explanations that I could understand, in terms of pushing and pulling, and I was thrilled.

Then, how does an internal combustion engine work? I entertained the absurd idea of making one out of wood, but was restrained by my clumsy carpentry.

How does an airplane fly? What is sound? I had played with the primitive "tin can" telephone, where a string is connected to the centers of the bottoms of two tin cans and then pulled tight. I could feel the vibrations in the string as someone spoke into one can, transmitting the vibrations along the string to reproduce the sound at the other can.

The wonders of the world were endless. Why do not the molecules of water wear out as they are perpetually rubbed against each other by the waves on a lake, or get broken as a raindrop impacts a rock?

My father worked at Consolidated Aircraft Company. My sister and brother were a year and a half and three years younger than I, respectively. My mother looked after us children, with my father participating in the evening. We sometimes went for walks along the deep gorges below Niagara Falls. The erosion of the swift river has cut a 100 meter down through layers of limestone, and it was a revelation to learn that the limestone was laid down in a shallow sea millions of years ago, from sediments eroded off the land, long before there were people in this world.

I wondered what it might have been like in those far off times.

When I was six I was given a 50 power microscope and shown the fascinating active microscopic world in a drop of water from a nearby pond. The family had inherited an excellent microscope from my deceased grandfather. That was the primary instrument for investigating the world of micro-organisms, which I could see to a lesser degree with my own little instrument. Crystals of sugar and salt were beautiful to behold, and I marveled at the different shapes, sizes, and colors of grains of sand. My father possessed a pocket compass, with which I was

られてしまいました。我が家には、亡くなった祖父の遺してくれた高性能の顕微鏡がありました。微生物の世界を観察する時には、もっぱらこちらの顕微鏡を使いました。私の顕微鏡では、そこまで小さなものを見ることはできなかったからです。顕微鏡で覗いた砂糖や塩の結晶は見とれるほど美しく、大きさも形も色も様々な砂の粒子を見た時は、驚嘆しました。父は携帯用のコンパスを持っていましたが、これにも私は心を奪われました。どうしてコンパスの針は北を示すのだろう。自動車のそばにコンパスを置くと針が振れ続けるのはなぜだろう。私は磁石でも遊んでいましたから、磁石同士が反発しあったり引き合ったりすることに気がつきました。なんと不思議な世界でしょう。

両親は私たち子供たちに、掃除の手伝い、ベッドメイキング、食事の支度といった簡単な家事を分担させました。おかげで、私たちには比較的幼い頃から家族の一員として働いているという自覚が芽生えていました。また両親は、私たちに絵を描かせたり、ボードゲームやトランプで遊ばせるだけでなく、自然や地域の珍しい地質に対する興味を引き出してくれました。川が流れる谷や氷堆積は、1万年前に氷河時代が存在したことを彷彿とさせました。私たち兄弟は本を読むようになりましたが、両親が読んでくれた冒険小説やおとぎ話、外国の旅行記といったより高度な本がずいぶん役に立ちました。

私が7歳の時、私たち一家はデトロイト近郊に移り、父はクライスラー社の技術部で働くようになります。その頃、父は地質学と生物学的進化について書いた『アース・フォー・サム (*Earth for Sam*)』という当時人気のあった本を読んでくれました。この本にはシルリア紀から更新世までが描かれていました。

正直に言うと、私は、学校の勉強はあまり好きではありませんでした。興味を引かれることは時々あったのですが、英語の単語は音声と綴りが一致しないので、綴りの勉強は苦手でした。発音の細かな違いを覚えるのも得意ではありませんでしたし、この点は成長しても一向に変わりませんでした。しかしそれでも私はあきらめませんでした。辞書のおかげもあって、今ではかなりできるようになりました。九九にもてこずりましたが、ようやくうまく言えるようになりました。割り算は、掛け算と引き算を使って系統立てて計算すればいいので、苦勞することはありませんでした。分数は初めてだったので、興味を覚えました。もっとも、春に分数の計算方法を学んだ後、秋にもう一度やり直しをさせられたのにはうんざりしましたが。

小学校の歴史の授業は、なんとなく面白そうだと思っていたのですが、授業内容は

fascinated. How did it know which way was north? And why did it become confused when near an automobile. I played with magnets, of course, and realized their awareness of each other. What a strange world!

My parents guided us children into simple household responsibilities, e.g., helping with cleaning, making beds, preparing meals, so that we felt ourselves to be a working part of the family unit from relatively early in life. They encouraged us to draw and paint, play board games and card games, and to be interested in nature and the natural geological monuments of that part of the country. River valleys and moraines were reminders of the ice age, now gone these 10,000 years. We learned to read, but we greatly profited from the more advanced reading that they did for us, with stories of adventure, fairy tales and journeys to other parts of the world.

When I was seven, we lived near Detroit, and my father worked for the Chrysler Engineering Division. It was about that time that he read a popular book on geology and biological evolution to me, with the title *Earth for Sam*. It started with the Silurian period and carried the narrative through to the Pleistocene.

I must confess that I was not an enthusiastic student at school. Interesting things turned up occasionally, but spelling lessons were difficult because of the ambiguities in the quasi-phonetic spelling of English words. My memory for isolated details was not good, nor has it improved as I have grown older. But I persisted, and with the help of a dictionary, I can do fairly well nowadays. I struggled with multiplication tables and eventually got that under control. Division can be done systematically using multiplication and subtraction, so that part was easy. Fractions were something new and interesting, except that after learning how to handle them in the Spring, we repeated the whole operation in the Autumn.

History in elementary school hinted vaguely at fascinating happenings, but the presentation was superficial, concentrating on dates and names rather than describing the nature and causes of the action. It has not occurred to some of the authors of introductory history texts that they have an interesting story to tell, with profound implications for our world today.

In high school I was introduced to algebra, Euclidean geometry, and trigonometry, which I liked very much because of their simple principles, unlike the baffling details of biology and social studies encountered in other classes. In my senior year I had the course in physics. It was, fortunately, an old-fashioned course that dealt directly and solely with the many phenomena and principles of

面白みに欠け、うわべだけの歴史的出来事が起こった年代やその名称ばかりで、それが起こった原因や性質については教えてくれませんでした。歴史の入門書を執筆する人たちの中には、現代社会に密接な関わりを持つ興味深い話を書いているなどと気付いていない人たちがいるのです。

高校に入ると、代数やユークリッド幾何学、三角法に出会いました。他の授業で学んだ生物や社会科のような細部にわたってわかりづらい科目とは違って、これらの科目は原理が単純であるため、大好きになりました。3年生になると、物理の授業を選択しました。幸運なことに、その授業は昔ながらのカリキュラムで進められ、力学、音、電気、磁気、光、熱力学に関する様々な現象や法則だけを直接取り上げたのです。社会的意味合いなどといった余分なことは一切行いません。教科書に載っていたのは写真ではなく木版画で、執筆者はミシガン大学で教えていた物理学者でした。物理の教師はぶっきらぼうな老人で、私たちにやる気をおこさせるような人物ではありませんでした。しかし、その教師の十分とはいえない知識やうまいとはいえない教え方の埋め合わせをしてくれたのが、物理学の魅力だったのです。物理学が自然界におけるあらゆる現象の基本であることは明らかでしたし、ほどなく私は、将来は物理学者になりたいと思うようになりました。祖父は物理学者でしたし、ベル研究所で物理学者をしている叔父もいましたので、物理学者として生計を立てていけると思いました。

私は入学試験で上位に入り、イースト・ランシングにあるミシガン州立大学の授業料が免除されることになりました。こうして1944年秋、物理学と数学を学ぶためにミシガン州立大学へと旅立ったのです。当時、世界中で一番面白い学問を勉強できるなんて、自分は世界一幸せな若者だと思いました。1年生の時はレスリング・チームに入りトレーニングに励みましたが、2年生になると勉強が忙しくなり、レスリングはあきらめざるをえませんでした。アマチュア・レスリングは素晴らしいスポーツです。体重は1年生の間に12キロ増えました。

私には、物理学の他にもう1つ別の計画があったことをお話ししておかなければなりません。高校時代、私はアルバイトで120ドル稼ぎました。ミシガン州から16ヘクタールの森林を購入したかったからです。当時、いったん木が伐採されてしまうと、その土地には価値がなくなり、土地の所有者は税金を払わなくなるため、多くの土地がミシガン州に返還されていました。ミシガン州としても、返還された土地は何の役にも立たないため、私は、貯めた120ドルで、州北部のシボイガン郡にある40エーカー、つまり16ヘクタールの土地を購入することができました。

mechanics, sound, electricity, magnetism, light, and thermodynamics. It made no extensive effort to digress into the social implications. The textbook used woodcuts instead of photographs and was written by a real physicist, at the University of Michigan. The gruff old man who taught the course was less than inspiring. But the fascination of the subject matter made up for what he lacked in knowledge and pedagogical skill. It was apparent that physics is the basis for all physical phenomena, and it was not long before I realized that I wanted to become a practicing physicist in the adult life that lay ahead of me. My grandfather had been a physicist, and I had an uncle who was a physicist at Bell Laboratories, so I knew I could earn a living that way.

I took a competitive examination and won a tuition scholarship to Michigan State University, in East Lansing. So in the Autumn of 1944, I went off to MSU to study physics and mathematics. I felt I was the luckiest young man in the world, studying the most interesting subject in the world. My first year I trained with the wrestling team, but by the second year my studies had become so time-consuming that I had to give it up. Amateur wrestling is a great sport. I gained 12 kilos that first year.

I should point out that I had another project running besides physics. During my years in high school I worked at odd jobs and eventually accumulated \$120. The goal was to purchase 16 hectares of forest land from the State of Michigan. Substantial areas of land had reverted to the State because, once the timber was cut, the land had no value, so the owner stopped paying taxes. The State had no use for such land, and my \$120 bought 40 acres (one quarter mile square) or 16 hectares in Cheboygan County in northern Michigan.

My brother and I rode our bicycles for three days (500 km) from Detroit and began building a log cabin during the summer of 1944. We finished the cabin the next year. In retrospect, we did many things the hard way, but we persisted and learned as we went along. About five years ago we put another new roof on the now nearly sixty-year-old cabin, along with other repairs, so it should be with us for many years to come. It is nice to be able to spend a few days in the forest, away from everything, with nothing but the swish of the wind in the trees and the croak of a distant raven. My children and grandchildren have learned to enjoy the cabin as they were growing up. My son and my brother get there a few times a year, more than I usually manage.

At MSU my studies progressed and I graduated in March 1948. I had

1944年の夏、私と弟はデトロイトから3日間かけて、500キロメートルの距離を自転車で走破し、丸太小屋作りを始めました。完成したのは翌年です。振り返れば、苦勞の連続でした。しかし私たちは最後までやり遂げ、その過程で多くのことを学んだのです。5年ほど前のことですが、2人で60年あまり前に建てたその丸太小屋を修理し、屋根を張り替えました。ですから、あの丸太小屋はこれから何年も私たちと共に生き続けるでしょう。木々の間を吹き抜ける風の音と遠くで鳴くワタリガラスの鳴き声以外は何も聞こえず、すべてから隔絶された森の中で数日間を過ごすことができるなんて、本当に幸せです。私の子供や孫たちは、成長するにつれ丸太小屋の良さがわかるようになりました。息子や弟は、私よりも頻繁に丸太小屋に出かけ、年に数回はそこで過ごしています。

ミシガン州立大学での勉強も順調に進み、1948年3月には卒業することができました。私は著名な先生方から物理学を教えていただきましたが、特に印象に残っているのは、トーマス・オズグッド教授とY・キクチ教授です。お二方の講義は素晴らしい内容で、大いに触発されました。私は大学院へ進学するため、カリフォルニア工科大学に願書を提出しました。後でわかったことですが、それまでカリフォルニア工科大学はミシガン州立大学出身者の入学を認めたことはなく、オズグッド教授の推薦状のおかげで、私の入学を認めたそうです。入学は認められたものの、奨学金は受けられませんでしたので、9月末にカリフォルニア工科大学へ出発する前に、クライスラー社技術部の物理学研究所で働くことができたのは幸運でした。6カ月分の給料をポケットに入れてデトロイトからバスに乗り込み、72時間かけてロサンゼルスへ向かったのです。

クライスラーの物理学研究所の責任者はC・R・ルイス博士でした。博士と私の父はクライスラーで働き始めた時期が同じで、しかも家族ぐるみの付き合いをしていたため、博士は私のことを子供の頃から知っておられました。私は研究所の臨時雇いとして様々なプロジェクトに参加し、多くのことを学びました。覚えているのは、ヒルシュ管を空調機器に応用できるかという研究です。これは驚くべき装置です。圧縮空気が管周囲の接線方向に噴出するように設定されたノズルから注入されると、管の中心部にある穴のあいた隔壁付近から冷気がこの穴とつながる一方の端へ噴出し、もう一方の端からは暖気が噴出するという仕組みです。私たちは摂氏マイナス15度の冷気を噴出させることに成功しましたが、あいにく全体効率がきわめて低かったため、実用化には至りませんでした。残念なのは、このヒルシュ管の原理が私には今もってわか

outstanding physics teachers, and I particularly remember Professor Thomas Osgood and Professor Y. Kikuchi. They taught excellent courses and encouraged me in many ways. I applied to the California Institute of Technology (Caltech) in Pasadena for admission to graduate school. Some years later I learned that Caltech had never had a student from MSU before, and it was Professor Osgood's letter of recommendation that convinced Caltech to give me a chance. So I was admitted without financial support, and it was fortunate that I could work in the Physics Laboratory at Chrysler Engineering before going off to Caltech at the end of September. I had six months pay in my pocket when I caught the bus from Detroit to Los Angeles, a 72 hour ride.

The Physics Laboratory at Chrysler was headed by Dr. C. R. Lewis, who had known me from childhood because he and my father started work at Chrysler at the same time, and the two families were acquainted. I was the extra hand in the laboratory and learned a great deal assisting in various projects. I remember our investigation of the Hilsch tube as a possible source of air conditioning. It is a remarkable device. Compressed air is injected through a nozzle aimed tangentially around the tube, next to a diaphragm with a hole in the middle. Cold air comes through the hole and out that end of the tube, while hot air comes out the other end. We achieved temperatures of -15°C , but unfortunately the overall efficiency is so low that there was no useful application. To my regret I still do not understand how the thing works. Why the cold air in the middle?

We developed a "poor man's" radar, using a super-regenerative oscillator, which is extremely sensitive to the arrival of a returning echo. It was intended for small boat owners, and it worked just fine, thanks to the electronic skills of James Lunen, who was in charge of the project. However, the Federal Communications Commission refused to allocate a frequency band, and the project died.

At one point we were ordered from somewhere high up in the management to develop a clock for automobiles using a thermal cycle rather than a mechanical balance wheel. It was a conspicuously stupid idea, because a thermal cycle, involving active heating and passive cooling, is very sensitive to the ambient temperature. But orders are orders, so we built several models. They worked fine, and if you timed the cycling, you could readily tell the temperature in the room. You may be amused to know that the temperature occasionally reaches 65°C in the interior of an automobile with the windows closed while sitting in the noontime sunlight on an asphalt parking lot. The thermal clock ran only about half as fast in that

らないことです。なぜ管の真中で冷気が発生するのでしょうか。

物理学研究所では、超再生発振器を用いた廉価版のレーダーを開発しました。このレーダーは反響を捉える感度がきわめて高く、小型船舶用に開発されたものです。プロジェクトの責任者であったジェームス・ルネンの電子技術のおかげで、性能は抜群でした。しかし、アメリカ連邦通信委員会が周波数帯の割り当てを拒否したため、プロジェクトは頓挫しました。

ある時私たちは、経営陣上層部の命を受け、機械のはずみ車ではなく、熱サイクルを利用した自動車用時計を開発することになりました。熱サイクルを利用した時計など、どう考えてもばかげた発想です。というのも、熱サイクルにはアクティブ・ヒーティングとパッシブ・ヒーティングがあり、周辺温度にきわめて敏感に反応するからです。しかし、命令は命令です。そこで私たちはいくつかのモデルを作りましたが、それらは立派に動きました。熱サイクルの時間を計れば、すぐに室温がわかります。真昼の日差しが照りつけるアスファルトの駐車場では、窓を閉め切った車の室内温度が摂氏65度に達することがあるとわかれば面白いかもしれません。熱サイクルを利用した時計は、そのような状況では約2分の1の速さでしか動きませんでした。

カリフォルニア工科大学の秋学期が始まり、私は光学や数学以外にも、W・R・スマイス教授の電気学と磁気学の講座とW・A・ファウラー教授の原子物理学の講座を履修することにしました。スマイス教授の講義は、問題を解いていく演習方式でした。教科書を読み、与えられた課題を解いていくのです。私にとって、これほど進度が速く、しかもたくさんの新しい概念を理解しなければならない講義は初めてでした。起きている間は、必死になって課題を解いていたため、場合によっては、原子物理学や光学の勉強にほとんど時間が割けないこともありました。スマイス教授の講義が始まって3週間がたった頃、私は、合格点をとれるほどに講義を理解しているのだろうかかと不安に思うようになりました。しかしなぜか6週間後には、課題がそれほど難しく感じられないようになっていたのです。相変わらず全神経を集中して課題を解かなければならないことには変わりはありませんでしたが、電磁気学について十分理解できたと思うようになりました。10週間後に行われた、スマイス教授とファウラー教授の期末試験で、私はAを取りました。

学業が順調だったことは幸運でした。というのも、クライスラー社で稼いだ資金が、冬学期までしかもたないことがわかったからです。資金の大半は学費に費やされたうえ、他の人たちと同様に、勉強する以外にも、食事をし、睡眠をとらなければな

circumstance.

Fall Quarter started at Caltech and I was enrolled in Professor W. R. Smythe's course in electricity and magnetism and in Professor W. A. Fowler's course in nuclear physics, along with a course in optics and another in mathematics. Professor Smythe's course was an exercise in problem-solving. I read the text and solved the assigned problems. I had never had a course that moved so fast and had so many new concepts to master. I spent my waking hours struggling with the assigned problems, occasionally devoting a little time to nuclear physics and optics as the situation demanded. Three weeks into Smythe's course I began to wonder if I could learn enough to get a passing grade. Then, somehow, by six weeks the problems did not seem to be so hard anymore. They still demanded my full attention, but I began to feel I was on top of the subject. At the end of the quarter (ten weeks) I aced the final examinations in both Smythe's and Fowler's courses.

It was fortunate that things came out well because I could see that my money from Chrysler Corporation would get me through Winter Quarter, but no more. Tuition took a big bite out of my finances, and, like most other humans, I was in the habit of eating and sleeping, in addition to studying. So I stopped by Professor Fowler's office one day and asked him if he knew of any jobs available, assisting in the laboratory, or whatever. He seemed surprised that I did not have an assistantship like the other students. He picked up the telephone and called Dean Watson, who was in charge of the sophomore physics course, in addition to being Dean of Students. It turned out that there was a position as a teaching assistant—someone had dropped out. So in ten minutes I had a teaching assistantship and my financial problem was solved.

Over the years I learned that Professor Fowler's boost for me was characteristic of the man. In later years I sat on various national committees with him, and he invariably played a strong positive role, with important suggestions and ideas, encouragement and a constructive approach to the task at hand. We were all happy to see him awarded the Nobel Prize in 1983, jointly with Professor S. Chandrasekhar, for his work in the low energy nuclear physics relevant to thermonuclear burning in stellar cores. You may recall that Professor Chandrasekhar was awarded the Nobel Prize for his early work on the mass limit for degenerate white dwarfs.

This seems as good a place as any to comment on some advice I received in preparation for attending Caltech. As I was leaving MSU, Professor Osgood remarked that when I got to Caltech I would meet the occasional person who was

らなかったからです。そこである日、私はファウラー教授の研究室を訪ね、研究室の手伝いでもなんでもいいから仕事を紹介してもらえないかと頼みました。私が他の学生のように助手の仕事に就いていないことを知り、教授は驚いたようでした。そして受話器を取ると、ワトソン学部長に電話をかけてくれたのです。ワトソン学部長は、学生部長であると同時に、2年生の物理学講座を担当しておられました。その電話で、講義助手を必要としていることがわかりました。前任者がやめた後、空席になっていたのです。こうして10分後には、私は講義助手のポストを手に入れ、金銭的問題は解決しました。

ずいぶん後になってからわかったのですが、私に口添えをしてくださったのは、いかにもファウラー教授らしいやり方だったのです。その後私は、国家レベルの様々な委員会で教授とご一緒させていただきましたが、教授は常に前向きで、強いリーダーシップを発揮され、貴重な示唆やアイデアを与えてくださいました。周囲の者を励ましてくださるだけでなく、取り組むべき課題にはいつも建設的なアプローチで臨んでおられました。教授が、恒星の核における熱核燃焼に関する低エネルギー核物理学における業績を評価され、S・チャンドラセカール教授と共に1983年のノーベル賞を受賞された時には、私たちの誰もが喜びました。チャンドラセカール教授については、縮退圧によって支えられた白色矮星の質量限界に関する初期の業績によりノーベル賞を受賞されたことを記憶しておられる方もいらっしゃるかもしれません。

ここで、カリフォルニア工科大学に入学するにあたって私がいただいたあるアドバイスの話しておきましょう。ミシガン州立大学を去るにあたって、オズグッド教授はこうおっしゃいました。「カリフォルニア工科大学には、時々えらく頭のきれる連中がいて、そういう連中の存在が脅威に感じられることがあるだろう。そういう連中は、難しい科目の授業を聞くだけで、何もしなくても翌日まで細かい点をちゃんと覚えているし、勉強しているようには決して見えない。」教授は、「そのような連中がいるとわかっていても決して自信を失ってはならず、情熱と将来への自信を持って、ひたすら研究に励みなさい」と言ってくださいました。

教授のアドバイスはありがたいものでした。実際、教授がおっしゃった通り、とてつもなく頭のよい同級生が2人いたからです。教授のアドバイスのおかげで、彼らの存在を知っても私は動じることもなく、歩みののろい私にも、彼らと同じように将来は約束されていると思うことができたからです。後に、そのとてつもなく頭のよかった同級生の1人は優秀な物理学者となりました。彼が失敗するはずがありません。も

so smart that it could be intimidating to know them. A person who listens to a lecture on a complex subject, effortlessly recalls the fine points the following day, and never seems to study or practice. Professor Osgood said not to be discouraged by such people. Just keep working away with enthusiasm and with confidence in the future.

I was glad for his remarks because I did meet a couple of fellow students who were superbright in the manner he had described. His remarks prepared me to see them in perspective and recognize that the future belongs to a plodder like me as much as it does to them. One of my superbright classmates subsequently did very well as a physicist. How could he fail? The other had no deep interest in physics and drifted off into something else.

The important thing to remember in the practice of science is to be sure that you thoroughly understand the basic principles and that you know how each application to specific phenomena follows from those principles. This is not an empty platitude. Some important branches of space physics and geophysics have suffered badly from a careless, seemingly plausible, leap into the dynamics of magnetic fields and ionized gases, thinking that the electric currents associated with the magnetic fields behave as they would in a fixed circuit in the laboratory. It all seems so plausible. But it is contrary to the basic principles of Newton, Maxwell, and Lorentz, if you take the trouble to work it out. For instance, pursuing the electric circuit analog has led to the idea that the magnetic field represents a huge inductance in the path of the current flow. Then blocking the electric current must produce enormous electric potential differences, which would accelerate electrons and ions to enormous velocities, thereby accounting for the production of high energy particles in flares on the Sun and in the magnetotail of Earth. Unfortunately there is no such effect because the ionized gas or plasma always moves in the frame of reference in which there is no significant electric field. At the same time the topology of the current changes, detouring around the blocked region. So there is no great potential difference and generally no significant particle acceleration.

So do not concern yourself with being, or not being, superbright. Take your physics, or whatever subject you wish to pursue, one step at a time, and be sure that you understand each step. You do not need to know everything, but you must be absolutely sure that you understand the principles that you actually use.

Getting back to my experiences at Caltech, my thesis advisor was Professor

う1人は物理学に興味を持つことができず、他の分野へ移ってしまいました。

科学の实践にあたって覚えておくべき重要なことは、基本法則をきっちりと理解し、そうした法則をいかにして特定の現象へ応用するかを知ることです。これは、無意味な決まり文句ではありません。宇宙物理学や地球物理学の重要な分野では、磁場を伴う電流が、一見もっともらしい理由に基づき、実験室の固定回路と同じように流れると不注意にも考えられてしまい、磁場や電離気体の力学にとびついてしまったことがあります。これは実に理にかなったことのように思えるかもしれませんが、時間をかけてきちんと考えれば、ニュートン、マクスウェル、ローレンツの基本的な法則に矛盾していることがわかるでしょう。例えば、電流回路の類推にこだわってしまい、磁場によってインダクタンスが大きくなるという考え方に行き着きました。この場合、電流を遮断すると大きな電位差が生じるはずですから、電子やイオンは急激に速度を増すことになり、これによって、太陽フレアや地球の磁気圏尾部での高エネルギー粒子の発生が説明できるはずですが、しかし、残念ながらこのような結果にはなっていません。と言いますのも、必ずしも電離気体もしくはプラズマが、電場の存在しない座標系を移動するとは限らないからです。これと同時に電流位相は変化し、遮断された領域を迂回します。ですから、大きな電位差も粒子の著しい加速も存在しないのです。

自分は頭がよいのか悪いのかなど気にしてはいけません。あなた自身の物理学、いや、あなたが極めたいと思っているテーマなら何でもかまわないのですが、それに一歩ずつ取り組んでいくことです。どの過程も確実に理解するようにしましょう。すべてを知る必要はありません。ただ、自分が実際に用いる原理をきっちり理解しておくようにしましょう。

カリフォルニア工科大学での経験に話を戻しますと、当時、私の論文指導教授はレベレット・デービス教授でした。教授は、終生変わらぬ私の友人です。教授も前向きな方で、指導学生を含め共同研究者を励まし、助けてくださいました。ちなみに、教授は大学院で1年間の優れた古典力学のカリキュラムをつくり、教えておられました。

次に、私の学生時代のある出来事についてお話ししましょう。あと2カ月ほどで博士号が取得できるというある日のこと、私は教務部から1通の手紙を受け取りました。その手紙は、あなたは1951年6月に博士号が取得できると思っておられるでしょうが、それは無理です。あなたは博士号取得を本校に申請されてから、必要な単位を取得しておられないため、博士号の取得は認められませんという趣旨のものでした。私はびっくり仰天し、デービス教授のところへ相談に行きました。教授曰く、

Leverett Davis, with whom I formed a lifelong friendship. He was another positive individual, who gave encouragement and assistance to his associates, including his students. Incidentally he constructed and taught a superb one-year graduate course in classical mechanics.

To relate an incident from my student days, I received a note from the Office of the Registrar about two months before I was expecting to receive the PhD. The note said, in effect, you think you are going to receive the PhD in June 1951, but you are not, because you have not earned enough credits since declaring to us your candidacy for the PhD. I was thunderstruck and went to seek Professor Davis's advice. He told me that Professor Smythe was the man who knew how to survive the mysterious ways of the Registrar. Professor Smythe looked at the note from the Registrar and leaned back in his chair and remarked that there were three ways to get around the difficulty. I felt much relieved. He outlined the three and recommended that the most effective procedure would be to petition the Registrar for retroactive registration of credit for research. I had not bothered to ask for credit for my research activities, because, by that time, I had plenty of academic credits to qualify for the PhD. I had been unaware of the obscure rule that a certain number of credits were required after declaring myself an actual candidate for the degree. Anyway, thanks to Professor Davis and Professor Smythe, I graduated in June 1951, as anticipated. I left Caltech with the warm feeling that I had been among friends. Not the Registrar, but the faculty.

This is perhaps the place to relate my awakening with my first encounter with scientific publication. My PhD thesis consisted of two parts. One was a dynamical treatment of interstellar gas clouds, then newly studied and thought to be self-gravitating individual objects. Then, assuming that the individual cloud represents a Hamiltonian system—in retrospect, a dubious assumption—I worked out the statistical mechanics of the clouds and showed that they all end up either expanded and dispersed to infinity or collapsed into some very compact form, e.g., a star. That portion of my research was accepted without question by the editor and referee for publication in the *Astrophysical Journal*.

The other part of the thesis pointed out that the long thin curved dust striations observed in the Pleiades can be understood only if there is a magnetic field of a microgauss or more in that region. The point was that the individual dust grains slip a long way when hit by an interstellar wind, so any initial striations would be blurred into a fuzzy cloud as the different-sized grains were picked up in the wind.

摩訶不思議な履修手続きをうまく切り抜ける術を知っているのはスマイス教授だと。スマイス教授は教務課からの手紙をお読みになると、椅子にもたれ、この難局を乗り切るには3つの方法があるとおっしゃいました。私はほっと胸をなでおろしました。そしてその3つの方法について手短かに説明してくださると、最も効果的な方法は、教務部に研究目的のための履修科目の遡及登録を申請することだと言われました。私は当時、博士号取得のためにたくさんの科目を既に取得していたので、わざわざ研究のための履修登録をしていませんでした。実際に学位取得を申請した後に一定数の単位の取得が必要だという、なんともわかりにくい規則があることなど知るよしもなかったのです。いずれにせよ、デービス教授とスマイス教授のおかげで、予定通り1951年6月に卒業することができました。私はたくさんの友達に囲まれていた日々を幸せに感じつつ、カリフォルニア工科大学を後にしました。もちろん、教務部は別です。私が言っているのは教員の話ですから。

このあたりで、学術論文の出版を初めて経験した時のことをお話ししておいたほうがよいかもしれません。私の博士論文は2部から構成されていました。1つは、星間ガス雲の力学的研究です。星間ガス雲については当時、研究が始まったばかりで、個々のガス雲は自己重力系だと考えられていました。今にして思えば心もとない仮定ですが、当時の私は個々のガス雲をハミルトニアン系と仮定した上で、ガス雲の統計力学を完成させ、ガス雲は無限に拡張と分散を繰り返すか、崩壊してきわめて小さな形、例えば星になるということを証明したのです。私の研究のこの部分は、『アストロフィジカル・ジャーナル (*Astrophysical Journal*)』で発表する論文として、編集者とレフリーに文句なく認められました。

もう1つの部分で私が指摘したのは、プレアデス星団に1マイクロガウス以上の磁場が存在すれば、その磁場で観測される細長く蛇行したダストの筋模様について説明が可能だということでした。重要な点は、ダスト粒子が星間風に当たると、はるか彼方まで飛ばされてしまい、その結果、大きさの異なる粒子が星間風に捕捉されるので、どんな筋模様もぼやけた雲のようになってしまうだろうということです。一方で、ダスト粒子は光電効果により帯電し、近くの星間磁場にくっつければ、磁場中にあるダストの不均一性が保たれ、望遠鏡で細い筋模様を観察することができるわけです。

おわかりいただきたいのは、当時私は博士論文のための研究を続けており、デービス教授をはじめとする方々が、星間ダスト粒子の位置が銀河の磁場によって決まるということを、観測された星の偏光によって示そうとされていたことです。すでにエン

On the other hand, the grains are charged photoelectrically, which would tie them to the local interstellar magnetic field, thereby preserving the initial cross-field inhomogeneities and providing the thin striations seen in the telescope.

It should be understood that at the time I was working on the thesis research, Professor Davis and others were showing how the observed polarization of starlight indicates that the interstellar dust grains are aligned, presumably by a galactic magnetic field. Enrico Fermi had already proposed an interstellar magnetic field in order to understand cosmic rays. So I had magnetic fields on my mind when I saw the dust striations in the Pleiades. My conclusion complemented the work by Fermi and by Davis, Greenstein, Spitzer, and Tukey, and others, with an independent line of reasoning that led to the same conclusion. So I was surprised, upon submitting the work to the *Astrophysical Journal*, to have it rejected out of hand by the editor on the grounds that magnetic fields have nothing to do with astrophysics. The paper had not been sent to a referee for review. Just rejected. So I published the work many years later—in 1958—in a review article for *Reviews of Modern Physics*. This was my first encounter with the “rational” character of some in the scientific community.

I mention it because it illustrates an endemic problem in scientific publication, which is as fierce today as it was fifty years ago. The principle victims are the young and relatively unknown scientists, particularly those proposing a new idea. The editors of the scientific journals can, in principle, alleviate the problem to a large degree, if they choose to take a more rational position than their colleagues. However, they would do so at some risk to their own research support. The eminent referee who declares a paper to be nonsense can be furious if the paper is published anyway. The eminent referee may subsequently be a reviewer of a grant proposal from the editor. Or worse.

It is usually easy to spot the irrational negative referee's report, because it lacks specific backing of the negative comments. There is no commitment to any facts, so the author receives nothing with which he can argue. I recall with amusement the referee's report on my first paper on the dynamical instability of the magnetic field in the gaseous disk of the Galaxy, submitted to the *Astrophysical Journal* in 1966. The report began with the words, “Well, I had always thought that Parker was competent, but...,” and there followed a lot of negative words that said nothing specific. The report said simply that if Parker knew as much about the Galaxy as the referee did, then Parker would not have submitted such nonsense

リコ・フェルミは、宇宙線を理解するために星間磁場という概念を打ち出していました。そのため、プレアデス星団にダストの筋模様を見つけた時、私の脳裏に磁場の概念が浮かんだのです。私の結論は、フェルミだけでなく、独自の推論を展開し、同様の結論を導き出したデービス、グリNSTEIN、スパイツァー、チューキーらの研究によって裏付けられました。ですから、『アストロフィジカル・ジャーナル (Astrophysical Journal)』に提出した論文が、磁場は宇宙物理学と無関係だという理由から、たちまち編集者に掲載を拒否された時には驚きました。あの論文は、再審査のためにレフリーの元へ送られることもありませんでした。とにかく拒否されたのです。そこで私は、数年後の1958年、この論文を『レビュー・オブ・モダン・フィジックス (Reviews of Modern Physics)』の総説論文として発表したのです。これが、科学界のいわゆる「合理性」との最初の出会いでした。

ここでこの話題に触れたのは、学術論文の出版に特有の問題が浮き彫りにされているからです。それは、50年前と変わりなく今も深刻な問題です。最大の犠牲者は、若くてどちらかといえば無名の科学者で、とりわけ新しい考えを提起しようとする人たちです。科学雑誌の編集者が同僚よりも合理的な立場をとれば、基本的には、問題を大幅に緩和することができます。しかし、そうすることで、自らの研究に対する援助を失うリスクを負うことになります。ある論文に対して、これはばかげていると言い放った著名なレフリーは、その論文が発表されれば烈火のごとく怒るでしょう。しかもその後、そのレフリーが編集者の提出した助成金申請書を検討することになるかもしれないのです。いや、もっとひどい事態が起こるかもしれません。

たいていの場合、レフリーの報告書は合理性に欠け、批判的だと言えます。批判的な論評を裏付けるだけの明確な根拠に欠けるからです。何らかの事実に基づいているわけではないのですから、論文の著者には議論を戦わせる材料が何も提供されないのです。今でも思い出すと笑ってしまうのは、私が初めて書いた論文に対するレフリーの報告書のことです。その論文は、1966年に『アストロフィジカル・ジャーナル (Astrophysical Journal)』に投稿したもので、その中で私は、銀河のガス円盤における磁場の動的不安定性について論じました。「常々パーカーは有能だと考えていたが、」という文言で報告書は始まっていました。その後は、何の具体的な指摘もなく、批判的な言葉が延々と並べられていました。要するに、そのレフリーは、パーカーが自分と同じくらい銀河のことを知っていれば、こんなばかげた論文を投稿しようなどとは思わなかっただろうと言いたかったのです。

for publication.

Chandrasekhar was editor of the *Astrophysical Journal* at that time. His office was just a little way down the hall from my office, and in discussing the report with him, I made the point that the only papers I had submitted to the *Astrophysical Journal* that drew strongly negative referee reports were the papers that contained something really new. I reminded him of the vigorous condemnation of my 1958 paper first pointing out the existence of the solar wind as a consequence of coronal expansion. He had sent the paper to two “eminent” referees, and both had condemned the ideas. He had published the paper anyway when I pointed out that the referees, for all their eminence, had no specific criticism to make.

The difficulty with scientific publication is serious and deserves attention, although I do not have space for further elaboration here. All I can say to young scientists is not to be surprised nor intimidated. Politely but firmly insist that the negative referee back up the criticism with hard facts. And if no hard facts are forthcoming, then suggest that publication is the only honorable outcome. Editors should have the courage to publish a paper if there is no factual criticism, and a brief reading of the report from a negative referee usually shows immediately whether there is sufficient substance to enable a scientific exchange with the author.

In 1951, jobs for physicists were not plentiful, and I ended up as an instructor in the Department of Mathematics, University of Utah in Salt Lake City, Utah. The department hired five new PhDs as instructors, with the verbal understanding that in two years we could expect to be promoted to assistant professor. As it turned out, however, toward the end of the second year the dean leaned on the chairman of the department to hold a firm line on the departmental budget. The chairman achieved that goal by dumping four of us instructors, thereby avoiding having to give raises. In retrospect we instructors were extremely naïve, failing to raise the issue of promotion earlier in the second year. So one day in May a senior member of the department walked into the office that we all shared and, looking rather angry, announced that the department had no intention of keeping us on in the autumn. Then he turned around and walked out. It was evident that he had just learned of the situation and was particularly annoyed by the fact that we were not told of it. I walked down to the chairman's office and asked him if it were true that we were fired at the end of the spring quarter. He looked a little surprised that I knew about it, but admitted that such was the case.

当時、『アストロフィジカル・ジャーナル (*Astrophysical Journal*)』の編集はチャンドラセカール教授が担当していました。彼の研究室と私の研究室とは近かったので、その報告書について彼と話し合った際に、私は次の点を強調しました。つまり、これまで『アストロフィジカル・ジャーナル (*Astrophysical Journal*)』に提出した論文の中でレフリーから激しく批判されたものは、きわめて新しいテーマを扱った論文ばかりだと。チャンドラセカール教授は私の話を聞いて、コロナの広がりから太陽風の存在を指摘した1958年の最初の論文も激しい批判にさらされたことを思い出しました。あの時、教授が私の論文を2人の「著名な」レフリーに送ったところ、2人とも私の発想を否定したのです。確かにこれらのレフリーは著名な人物かもしれないが、具体的な批判になっていないと指摘すると、教授はとにかく論文を掲載してくれました。

ここではこれ以上詳しく触れる余裕はありませんが、学術論文の掲載に伴う難しさは深刻で、十分注意しなければなりません。若い科学者の皆さんに言えることは、驚く必要も恐れる必要もないということです。丁重にしかし毅然とした態度で、レフリーが論文を否定する確固たる根拠を示すように要求するのです。もし確固たる根拠がないなら、こう言います。掲載することが唯一の正しい結論だと。批判が事実に基づくものでないのなら、編集者は勇気を持ってその論文を掲載すべきです。否定的なレフリーが書いた報告書をざっと読めば、論文の著者との科学的議論が可能な批判かどうかはすぐにわかるものです。

1951年、物理学者の就職口はそれほど多くありませんでした。結局私は、ユタ州のソルトレイクシティにあるユタ大学の数学研究科の講師に就任しました。この数学研究科では、博士号を取得したばかりの5名を採用したのですが、当時の口頭の了解では、2年後に全員が助教授に昇進することになっていました。ところが、2年目の終わりになって、学部長が研究科予算の執行にあたっては厳しく臨むよう学科主任に圧力をかけたのです。学科主任は、私たち5人のうち4人を解雇することでその目標を達成し、結果として給与の支払いを抑えることができました。今にして思えば、私たち講師は全くの世間知らずであったため、2年目に入っても昇進問題を持ち出すことができませんでした。そのため5月のある日のこと、学科のとある古参の教官が私たちの部屋にやってきました。彼は憤懣やるかたない様子で、学科には私たちを秋以降も採用する意思がないことを告げました。彼はそれだけ言うと、私たちに背を向け研究室を出て行きました。彼はその事実を知ったばかりで、私たちに何も知らされていないことを不愉快に思ったにちがひありません。私は学科主任の部屋へ行き、春

In fact, being fired from the department was one of the best things that has happened to me. I had become acquainted with Professor Walter M. Elsasser in the Department of Physics, and we had had several interesting conversations on various scientific points. So I walked by his office and asked him to let me know if he heard of any positions becoming available, explaining that I had just discovered that I was out of a job at the end of June. The next day, Elsasser came by my office and asked me if I would like to be a 2/3 time research associate with him and a 1/3 time assistant professor in the Department of Physics. Physics needed someone to teach the elementary course in astronomy, and I guess I was as much an expert as any. Needless to say, I accepted on the spot and my scientific career began to move forward.

To make a long story short, Walter Elsasser was one of the great minds of his generation of physicists. He was the first to propose an electron diffraction experiment to test the reality of the de Broglie wave hypothesis. Unfortunately, as a Jew at Heidelberg, he was obliged to leave without doing anything about it. He was the first to point out that the enormous thermal neutron absorption cross section of the beryllium nucleus was a measure of the de Broglie wavelength of the thermal neutron and had nothing to do with the actual size of the nucleus. He was the first to point out nuclear shell structure. He was the person who pointed out that the only tenable hypothesis for the origin of the magnetic field of Earth is by induction in the convection in the liquid metal core. Later, in the 1960s, he became the first to apply the concepts of information theory to biology, which has all been reinvented in the past couple of decades without realizing that Elsasser did the basic work about 45 years ago.

When I went to work for Elsasser in 1953, he was still grappling with the problem of producing the geomagnetic field in the convecting core. So my education in magnetohydrodynamics got underway, using an extensive article by Stig Lundquist in *Arkiv f. Physik* and a paper by Elsasser that was in the process of publication.

I could not have had better textbooks. I should explain that up to that point Elsasser had shown that the non-uniform rotation of the core produces a strong east-west (azimuthal) magnetic field in the core through its interaction with general dipole (north-south) field that we see up here at the surface of Earth [Fig. 1]. The problem was to understand how the north-south dipole field was generated. Elsasser had shown that without ongoing regeneration, the north-south field that we see would decay away in a characteristic time of 30,000 years. Professor T. G. Cowling

学期で私たちが解雇されるというのは本当かどうか尋ねました。彼は、私がその話を知っていたことに少し驚いた様子でしたが、その通りだと答えました。

実は、数学研究科を解雇されたことも、私にとって幸運なことだったのです。当時、私は物理学研究科のウォルター・M・エルザッサー教授と懇意で、教授とは科学に関するいろいろな問題についてよく熱心に話し合いました。そこで私は彼の研究室を訪れ、6月末で失業してしまうのですが、どこかに空きのあるポストはないだろうかと思いましたが、翌日、私の研究室にやってきたエルザッサー教授は、3分の2を彼の研究助手として働き、3分の1を物理学研究科の助教授として働く気はないかと申し出てくれました。物理学研究科では、天文学の基礎講義を担当する教員を探していたのです。おそらく私は、他の誰にも負けないほどの専門知識を持っていたはずですが、その話を即座に受け入れたことは言うまでもありません。こうして私の科学者としての人生が始まったのです。

手短にご説明しますと、ウォルター・エルザッサー教授は、彼と同世代の物理学者の中でもきわめて優秀な人物の一人です。彼は、ドブロイ波の仮説を検討するため、電子回折実験を最初に提案しました。ユダヤ人である彼は、残念なことに、このテーマに取り組むことなくハイデルベルグ大学を去らざるをえませんでした。エルザッサー教授はまた、ベリリウム原子核の巨大な熱中性子吸収断面が熱中性子のドブロイ波長の目安であり、原子核の実際の大きさとは関係がないということを初めて指摘した人物でもあります。さらに、原子核の殻構造も明らかにしました。地球の磁場の起源について最も有力な仮説は、液体金属核における対流によって生まれたという説だと主張したのも彼です。その後、1960年代には、情報理論の概念を生物学に初めて応用しました。なお、この点はここ数十年の間に新しく提起されたのですが、45年前にすでにエルザッサー教授が基本的な研究を行っていたことに気付いた者はいませんでした。

私がエルザッサー教授のもとで働き出した1953年頃、教授は相変わらず核の対流による磁場の形成という研究に取り組んでいました。そのため私は、『アルキフ・フル・フィジック (Arkiv för Physik)』に掲載された、スティグ・ルンドクヴィスト氏の長い論文と、当時エルザッサー教授が発表を予定していた論文を使って、磁気流体力学の講義を始めました。おそらくこの2つの論文以上に優れた教科書はなかったと思います。すでにエルザッサー教授が、核の不均一な回転が地表の一般的な双極子(南北)磁場との相互作用により、東西方向の強い磁場を核の中に形成することを証

had shown 19 years before that it is impossible for fluid motions to sustain a field with rotational symmetry about any axis. And the north-south and the east-west fields were symmetric about the axis of Earth. So I thought about the problem for a while, and drew many sketches of how the magnetic field lines would be deformed by diverse fluid motions. I finally realized that local circulation in meridional planes, representing the north-south field, is produced by rising convective cells in the core which also rotate about a vertical axis—cyclonic convection [Fig. 2]. The rising fluid exhibits rotation because Earth is rotating. It was then a straightforward task to write down the dynamo equation describing this effect, so that with the equation describing the production of the east-west field by the non-uniform rotation, I had the complete set of dynamo equations. Their solution exhibited steady magnetic fields sustained by the combination of non-uniform rotation and cyclonic convection. So we had the explanation for the regeneration of the magnetic field of Earth. Then I was interested to see that the solutions varied periodically in time when applied to a relatively thin layer of convection, as is the case for the Sun. Thus the combination of non-uniform rotation and cyclonic convection in the Sun also accounted for the creation of the 11-year magnetic cycle of the Sun. I was greatly encouraged when my two papers on the subject were accepted for publication. Ten years later, others began to be interested in the subject, and have explored the solutions of the dynamo equations at considerable length. It appears that the combination of non-uniform rotation and cyclonic convection is the principal source of magnetic field in some planets, most stars, and probably the Galaxy.

During this time it became clear that there was not much prospect for advancement at the University of Utah, and Elsasser advised me to begin looking elsewhere. He was thinking about leaving too. So when I was offered a position as a research associate with John Simpson at the University of Chicago, I accepted and departed Salt Lake City for Chicago at the end of June 1955. I shall be forever grateful to Walter Elsasser. He introduced me to magnetohydrodynamics and proposed an important problem for solution. My success rode on his fundamental formulation of that problem.

In my last year in Salt Lake City, Niesje Meuter and I were married, providing another big boost to my life. I built a trailer to carry our worldly goods and we made the long drive to Chicago. We rented a small apartment across the Midway from the university. Our daughter Joyce was born in our first year in Chicago. Our son Eric was born three years later, by which time I was an assistant professor in

明していた点についてお話ししておかなければなりません(図1)。問題は、南北の双極子磁場がどのように形成されたかということでした。エルザッサー教授は、絶え間のない再生機構がなければ、観察されている南北の磁場は3万年という時間尺度で崩壊することを示しました。T・G・カウリング教授は、すでにその19年前、流体運動はいかなる軸についても回転対称性を持つ磁場を維持できないことを証明していました。実際には、南北および東西の磁場は、地軸について対称でした。そこで私はこの問題についてしばらく考えた末、磁力線が様々な流体運動によってゆがめられる可能性をいくつかのスケッチに描いてみました。そしてついに、南北の磁場を示す回転軸を含む平面における局部循環が、鉛直方向の軸で回転する核内の上昇対流セルによって形成されること、すなわち回転する対流の存在に気付いたのです(図2)。地球が回転しているため、上昇流体も回転します。これをダイナモ方程式で表すことは実に単純な作業でした。さらに不均一な回転による東西磁場の形成を説明するための方程式を完成させることで、私のダイナモ方程式すべてが完成したのです。この解は、安定した磁場が、不均一な回転と回転する対流によって維持されることを示しています。さらに、これに基づいて、地球磁場の再生も説明できたのです。次に私が興味を覚えたのは、太陽の場合と同じように、この解を対流の比較的薄い層に適用した場合、周期的に変化することです。かくして、太陽における不均一な回転と回転する対流によって、太陽の磁場サイクルがなぜ11年周期なのかという問題を説明することができるようになりました。このテーマに関する私の2つの論文が掲載を認められ、大いに元気づけられました。10年後、他の科学者たちがこの問題に興味を持つようになり、ようやくダイナモ方程式の解に検討が加えられるようになったのです。一部の惑星、ほとんどの恒星、そしておそらく銀河にも存在する磁場を形成しているのは、主に不均一な回転と回転する対流であると思われます。

この間、ユタ大学にいてもこれ以上の昇進が望めないことがわかったため、エルザッサー教授は他の勤め口を探してはどうかとアドバイスしてくださいました。教授自身も辞職を考えておられました。このような事情から、シカゴ大学のジョン・シンプソン氏の下で研究助手にならないかという申し出があった時、私はその申し出を受け入れ、ソルトレークシティを離れてシカゴへ向かったのです。1955年6月末のことでした。私は、ウォルター・エルザッサー教授に対する感謝の念を一生忘れることはありません。電磁流体力学の存在を教えてくれたのも、解明に向けて重要な問題を提起してくれたのも彼でした。私が物理学者として成功できたのも、その問題につい

図1 対流する液体鉄の核内部の南北(双極子)磁場の磁力線を示す図。核内部の回転が速くなると、磁力線が核の周りに伸び、北半球では東方向の磁場、南半球では西方向の磁場を形成する。内核は図から省略してある。

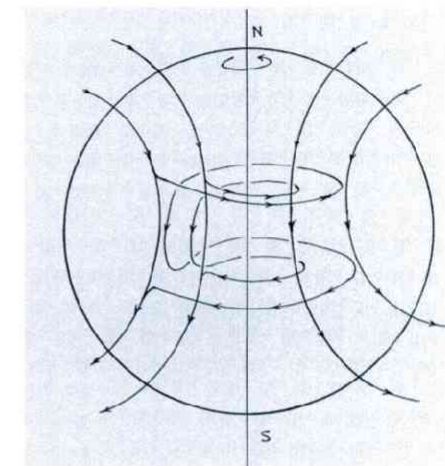


Fig.1 A sketch of the field lines of the north-south (dipole) magnetic field in the convecting liquid iron core of Earth. The more rapid rotation of the inner regions of the core stretches the field lines around the core to form the east pointing field in the northern hemisphere and the west pointing field in the southern hemisphere. The inner solid core is omitted from the sketch.

図2 個々の回転する上昇対流セルにより東西磁場上に生じたループの上昇と回転を示す図。個々のループの回転方向は、南北(双極子)磁場の回転方向と同じ。

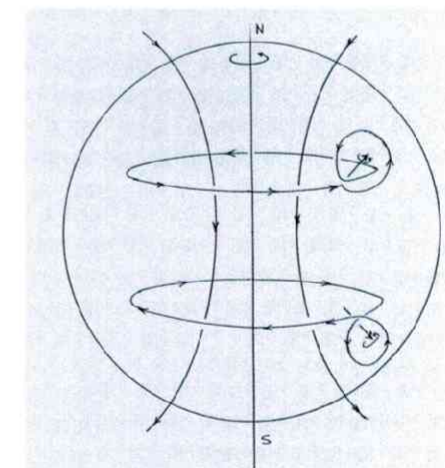


Fig.2 A sketch of the raised and rotated loops formed in the east-west field by individual rising cyclonic convective cells. Note that the sense of the circulation of each loop is the same as the circulation of the north-south (dipole) field.

て彼が築き上げてくれた基礎があったからこそなのです。

ソルトレークシティで過ごした最後の年に、私はニーシャ・ミューターと結婚しました。彼女との結婚も私の人生の大きな励みになりました。私はハウストレーラーを造り、家財道具を積み込むと、シカゴへの長い旅に出発しました。シカゴでは、大学からミッドウェイ空港をへだてたところにある小さなアパートを借りました。シカゴに移って1年目に娘のジョイスが生まれました。その3年後には息子のエリックが生まれましたが、その頃には、物理学研究科と現在のエンリコ・フェルミ研究所の前身である、原子力研究所の助教授に昇進しました。人生は好転しつつありました。シカゴ大学は研究にうってつけの場所でした。担当する講義数は少なく、同僚は気の合う人たちばかりで、お互いの研究に興味を持っていました。

シンプソン氏の話で後から知ったことなのですが、S・チャンドラセカール教授が私を研究助手のポストに推薦してくれたそうです。ユタ大学時代に、興味を持っていた乱気流論を通じて、私は教授と知り合いました。当時、コルモゴロフとハイゼンベルグ両氏の論文がきっかけとなり、乱流理論は大きな注目を集めていたのです。

ジョン・シンプソン氏は世界的に行われていた宇宙線の研究に没頭していました。私もその研究に参加し、観測結果の理論的意味について検討しました。私は観測結果に夢中になり、なんととしてでもその意味をつきとめたいと思うようになりました。まずわかっていたいただきたいのですが、宇宙線は主に陽子から成っており、光速に近い速さで移動します。銀河の中の、おそらく超新星などからやって来ます。惑星間空間を通過し、地球に衝突するものもあります。太陽黒点や太陽フレアといった太陽活動の間、宇宙線が弱くなるのは、なぜか宇宙空間の状態が原因なのです。あの当時、宇宙に機材を運ぶ手段がなかったことをご理解いただきたいのです。そこでシンプソンは、宇宙の知られざる状況をつきとめるために、宇宙線の時間変化を調べていました。彼は低エネルギー宇宙線と高エネルギー宇宙線の時間変化を識別するため、分光計として地球の磁場を利用しました。両極であればすべての宇宙線が地球に到達できるのですが、地球の南北の磁場により、赤道では高エネルギーの宇宙線だけしか地球表面に到達できません。彼は、時間変動がどのように起こるかということについて、理論上の可能性を絞り込もうとしたのです。予想通り、高緯度地点における宇宙線の時間変化は、赤道におけるそれよりも極めて大きいことがわかりました。宇宙線の陽子が大気圏の上層で遮断されてしまうことは私たち人間にとっては幸運なことなのですが、その事実が、この単純な概念を複雑にしているのです。そこでシンプソン氏とし

the Department of Physics and in the Institute for Nuclear Studies, now the Enrico Fermi Institute. Life was looking up. The University of Chicago is a great place to pursue research. The teaching responsibilities are modest and my colleagues were congenial and interested in each others' work.

I learned later, from a remark by Simpson, that Professor S. Chandrasekhar had recommended me for the research associate position. I had become acquainted with Professor Chandrasekhar through a mutual interest in the theory of turbulence during my time in Utah. Turbulence was a hot topic in those years, inspired by the work of Kolmogoroff and Heisenberg.

John Simpson was vigorously pursuing world-wide studies of the cosmic rays, and I was brought on board to look into the theoretical implications of the observations. I was fascinated by the observations and eager to make some sense out of them. It should be understood that cosmic rays consist mostly of protons, traveling near the speed of light. They come from somewhere out there in the Galaxy (presumably from supernovae etc.), and those that collide with Earth have passed through interplanetary space on the way. The fact that the cosmic ray intensity is reduced during times of solar activity (sunspots and flares) is somehow a consequence of conditions in space. It must be appreciated that there was no means in those days for sending an instrument into space. So Simpson was studying the time variations of the cosmic rays as a means for probing the unknown conditions in space. He used the magnetic field of Earth as a spectrometer to separate the variations of the low energy and the high energy cosmic rays. The north-south magnetic field of Earth allows only the higher energy cosmic rays to arrive at the surface of Earth at the equator, whereas all cosmic rays are free to come in at the poles. His goal was to restrict the theoretical possibilities as to how the variations were created. As one might expect, the variations of cosmic rays at high latitudes were substantially larger than at the equator. This simple concept is complicated by the fact that the cosmic ray protons are stopped at the top of the atmosphere—lucky for us—so that it required Simpson's invention of the ingenious cosmic ray neutron monitor to have a sensitive cosmic ray detector here on the surface of Earth.

The traditional view of space was a hard vacuum. Nothing there except for the lone cosmic ray particles (they are about 10 meters apart in space) and the occasional burst of solar corpuscular radiation and solar cosmic rays spit out by a flare on the Sun. It was inferred that the solar corpuscular radiation consisted of equal numbers of protons and electrons traveling at perhaps 1000 km/sec to arrive

ては、わずかな宇宙線まで検知するために、精巧な宇宙線中性子モニターを発明する必要があったのでした。

従来から、宇宙空間は全くの真空と考えられていました。そこには何も存在せず、あるのはただ、宇宙空間で粒子同士が約10メートル離れ、さびしく漂う宇宙線の粒子と、フレアという、時折起こる太陽表面での爆発による粒子線、そしてフレアで生じた太陽宇宙線だけだと。太陽粒子線は同数の陽子と電子なら成り、秒速約1000キロメートルの速さで宇宙空間を移動し、フレア発生後、1、2日で地球に到達すると考えられていました。したがって、宇宙には別の意味で何も存在しないと「考えられていました」。ですから、宇宙線の時間変動が観測されるのは、宇宙の強い電界によるもの、あるいは地球磁場の変動によるものとされたのです。地球磁場の変動は、太陽活動が活発な時期にそれが契機となって発生するのですが、原因はわからないものの、さらなる宇宙線の粒子を遮蔽するのです。

シンプソン氏の広範囲にわたる測定の結果、この考えは覆されました。なぜなら、時間変化のエネルギー依存度は、宇宙空間における様々な磁場の存在のみで説明可能だということが証明されたからです。

1956年2月23日の巨大フレアによって、惑星間空間の生々しい姿が明らかになりました。この時のフレアでは、太陽宇宙線がものすごい勢いで放出されました。つまり、陽子が光速に近い速さで移動したのです。この宇宙線があつという間に地球に到達したことから、多かれ少なかれ、太陽から地球までは惑星間磁場が直接つながっていることが明らかになりました。ところが、その後、太陽宇宙線の速さが減速したことから、火星の軌道の外側に、何らかの形態の直交成分の磁場があることがわかりました(図3)。私はすっかり夢中になりました。惑星間空間を移動するプラズマが磁場を変化させているにちがいありません。そうでなければ、磁場がそのような特徴的な形態をとるはずがないからです。

1956年暮れのある日、ミュンヘンのマックス・プランク天文物理学研究所のルートヴィヒ・ピアマン教授がジョン・シンプソン教授を訪れました。彗星のガスの尾が太陽と反対の方向にたなびく様子がいつも観測されるのは、尾が太陽粒子線によって押し流されるからだとするピアマン教授の説について、私は教授と話す機会を得ました。他の人たちはこの問題を真剣に受け取っていないようでしたが、私からすれば、太陽活動の一般的レベルや彗星が通過する太陽の緯度に関係なく、彗星の尾が太陽と反対の方向にたなびくことは驚くべき事実でした。明らかに、太陽粒子線は太陽の特

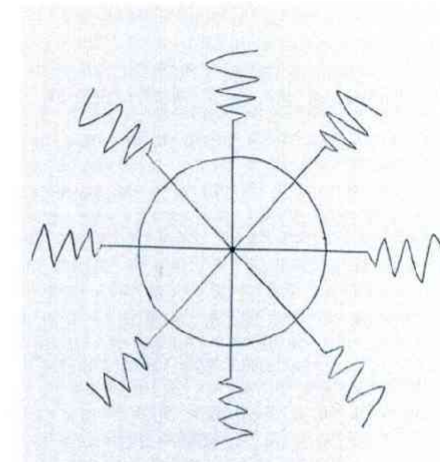


図3 1956年2月23日のフレアから放出された太陽宇宙線の動きによって示される内部太陽系の磁場を示す図。円は地球の軌道を表し、あまり遠くない未確定距離では、磁場は軸方向に直交している。

Fig.3 A sketch of the magnetic field in the inner solar system suggested by the behavior of the solar cosmic rays from the flare of 23 February 1956. The circle represents the orbit of Earth, with the field becoming transverse to the radial direction in some unspecified way not far beyond.

at Earth in 1–2 days after the flare. But space was “known” otherwise to be empty. So the observed cosmic ray variations were attributed to powerful electric fields in space, or to fluctuations in the magnetic field of Earth that somehow excluded more cosmic ray particles when the Sun was active and the geomagnetic field was agitated.

Simpson’s extensive measurements swept this away, showing that the energy dependence of the variations can be understood only in terms of variable magnetic fields in space.

The conditions in interplanetary space were vividly illustrated by the great flare of 23 February 1956, which emitted an intense burst of solar cosmic rays, i.e., protons traveling at nearly the speed of light. Their prompt arrival at Earth showed the interplanetary magnetic field to be connected more or less directly from the Sun to Earth, while the subsequent slow decline of the solar cosmic rays indicated transverse fields of some form beyond the orbit of Mars [Fig. 3]. I was fascinated. It was evident that there was moving plasma in interplanetary space to manipulate the magnetic fields, because the magnetic fields would otherwise not have this remarkable form.

Then one day in late 1956 Professor Ludwig Biermann, from the Max Planck Institut für Astrophysik in München, visited John Simpson, and I had a chance to talk with Biermann about his point that the gaseous tails of comets, observed

殊な状況に起因して発生するのではなく、常に惑星間空間のすべてを満たしているのです。

その後ほどなくして、コロラド州ボルダーにある高高度観測所を訪れた私は、シドニー・チャップマン教授と実に興味深い話をすることができました。教授は、ある事実からもたらされた結果について研究しておられました。その事実とは、太陽のコロナを形成する100万度のガスは、一種の高性能の熱伝導体のようなもので、放射によってわずかに温度が低下するにすぎないため、100万度という熱は宇宙に広がっていくというものです(図4)。実際、彼は、コロナが地球の軌道を越えて広がることを証明しました。つまり、宇宙空間に何も存在しないわけではないのです。太陽圏で満たされているのです。

これは重要な推論であり、意味深い結果をもたらすものでした。私は、ある時ふと、コロナがそれほど広範囲に広がるのであれば、ピアマン教授が彗星の尾から推論した、全宇宙におよぶ太陽粒子線を遮断するのではないかと考えました。この発想は、1つのプラズマが別のプラズマの中を高速で突き抜けるとすれば、この2つの流体のイオンと電子の間の静電気力はプラズマ波を引き起こし、お互いの動きを止めてしまうという事実から得られたものです。その結果、ピアマン教授とチャップマン教授の説は両立しえないように思われました。宇宙全体に広がる太陽粒子線が存在するか、あるいはコロナが広がるのか、そのいずれかであって、両方ということはありえないのです。しかし、それでもなお私の手元にある材料だけでは、どちらが正しいとも言いがたい状態でした。この点について考える必要がありました。もし矛盾する2つの説が出てきたら、両者の矛盾点を徹底的に検証すると興味深いことがわかってくるでしょう。

さて、太陽の粒子線が太陽から常時、全方向に放出されているとすれば、太陽フレアや太陽黒点の影響を受けない、ある単純な発生源が存在するはずで。私は、間断なく広がる100万度のコロナから粒子線が発生しているのではないかと考えるようになりました。以前ならこのようなことは考えられませんでした。と言いますのも、太陽の強力な重力場からそれぞれのイオンが飛び出そうとする場合、100万度や200万度の温度では十分とはいえないからです。しかし、チャップマン教授の研究で、地球の軌道における温度は100万度程度であることが証明されました。したがって、コロナガスが太陽から簡単に脱出できることは明かです。実際には、ガスは太陽系に膨張して脱出せざるをえないのです。私は、初期の頃の論文で、希薄なプラズマの広範囲

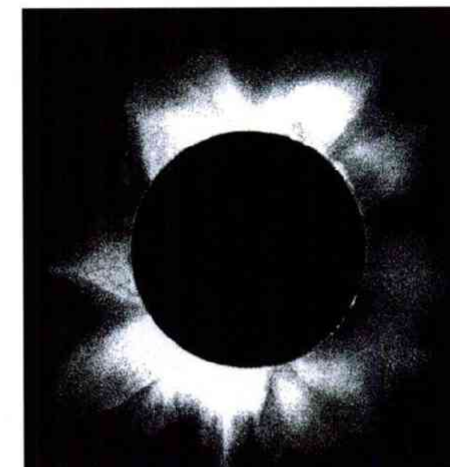


図4 1980年2月16日の皆既日食に太陽のコロナから放出された可視光線の写真。高高度観測所とメンフィス大学チーム(High Altitude Observatory and Southwestern at Memphis College)が撮影。

Fig.4 A picture in visible light of the corona of the Sun during the total solar eclipse of 16 February 1980, taken by the High Altitude Observatory and Southwestern at Memphis College team.

always to point away from the Sun, do so because the tails are swept away by streams of solar corpuscular radiation. Although no one else seemed to take it seriously, it struck me as remarkable that comet tails point away from the Sun no matter what the general level of activity of the Sun and no matter whether the comet passed by at low or high heliographic latitude. Evidently the solar corpuscular radiation originated in no special feature of the Sun and filled all of interplanetary space all the time.

A little later, while visiting the High Altitude Observatory in Boulder, Colorado, I found myself in a very interesting discussion with Professor Sydney Chapman. He was working out the consequences of the fact that the million degree gas that makes up the corona of the Sun is such an excellent conductor of heat, and cools so little by radiation, that the million degree temperature extends far out into space [Fig. 4]. Indeed, he showed that the corona extends well beyond the orbit of Earth. So space was not empty, but filled with the extended atmosphere of the Sun.

That was an important inference, with profound consequences. It occurred to me sometime later that so extended a corona would block the universal solar corpuscular radiation inferred by Biermann from the comet tails. The blocking followed from the fact that, if one plasma moves rapidly through another, the electrostatic forces between the ions and electrons of the two streams kick up plasma waves and the two streams lock together. So the ideas of Biermann and Chapman

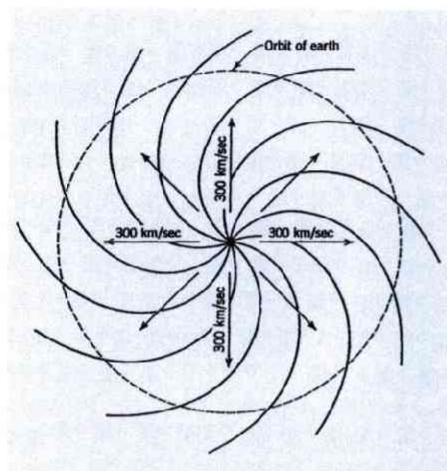


図5 地磁気静穏日の理想化された均一太陽風(300km/秒)による太陽磁場の拡大から生じた静穏日の惑星間空間磁場の磁力線。

Fig. 5 The lines of force of the quiet-day interplanetary magnetic field resulting from extension of the general solar field by an idealized uniform 300 km/sec quiet-day solar wind directions.

に及ぶ力学について研究し、流体力学に基づく従来の方程式によってきわめて希薄なコロナガスの膨張をうまく説明できることを証明しました。コロナガスの放射状の流出を表す方程式を完成させた結果、太陽近くの高濃度ガスの中ではきわめてゆっくりと膨張を始め、高温の中では徐々に加速され、ついには秒速300キロメートルから1000キロメートルという超音速で太陽のはるか彼方まで広がっていくことを表した方程式の解があるのは明らかでした。つまり、全宇宙に広がる太陽粒子線が存在し、星間の真空空間に流れ込んでいるのです。決して高速に達しない膨張を表す数学的な解は他にもいくつかありましたが、その場合、星間空間内部から圧力がかかり、超音速で膨張しないようにしなければなりません。そのような圧力は存在しないのですから、考える唯一の可能性としては、超音速の膨張しかないのです。結局、私はこれを太陽粒子線ではなく「太陽風」と名づけることにしました。「太陽風」という言葉なら、「太陽粒子線」という言葉から想像される太陽から放出される多数の自由粒子という概念ではなく、気体の流体力学的な流れという概念がうまく伝わるからです。

太陽コロナが宇宙空間に膨張するということが理解できれば、太陽風が螺旋を描いて太陽の外へ磁場を伸ばし(図5)、さらにいくつもの惑星を越えて星間空間にまで広がり、ついには星間ガスや星間磁場によって押し戻されてしまうことを証明するのは簡単です。現在、最も精度の高い推定としては、超音速の太陽風が常に存在している衝撃波を突きぬけ、100天文単位近辺で、つまり太陽と地球の距離の100倍の距離の

seemed mutually exclusive. Either there was universal solar corpuscular radiation or there was an extended corona, but not both. And yet I could not see how either could be avoided, given the evidence at hand. It was something to think about. When you have a contradiction, it is likely that you may learn something interesting when you follow up on it.

Now, if the solar corpuscular radiation is emitted in all directions from the Sun at all times, it must have some simple origin, something that does not depend of flares or sunspots. I began to wonder if it might arise from the continuing expansion of the million degree corona. This was not considered previously because a million or two degrees is not hot enough for the individual ions to escape from the powerful gravitational field of the Sun. But Chapman's work showed that the temperature was still a significant fraction of a million degrees out here at the orbit of Earth. Hence it was obvious that the coronal gas out here easily escapes from the Sun. Indeed, the gas cannot help but escape, expanding out through the solar system. Some earlier work that I had done, exploring the large-scale dynamics of a tenuous plasma, showed that the conventional hydrodynamic equation properly describes the expansion of the very tenuous coronal gas. Writing down the equation for the radial outflow of the gas, it was evident that there was a mathematical solution of the equation that started very slowly in the dense gas near the Sun and gradually accelerated outward in the sustained high temperature, eventually reaching supersonic speeds of 300–1000 km/sec far out from the Sun. That provided the universal solar corpuscular radiation that streams away into the vacuum of the surrounding interstellar space. There were other expanding mathematical solutions that never reached high speeds, but they required an inward pressure from interstellar space to prevent them from expanding supersonically. Lacking any such inward force, the only possibility was the supersonic expansion, which I eventually decided to call the *solar wind* instead of solar corpuscular radiation. The term *solar wind* properly conveys the concept of a hydrodynamic flow of a gas rather than a lot of free particles shot out from the Sun, as implied by the term *solar corpuscular radiation*.

Once it is understood that the solar corona expands away into space, it is a simple exercise to show that the solar wind stretches magnetic fields outward from the Sun into a spiral [Fig. 5], extending out past the planets into interstellar space for as far as the wind can push back the interstellar gas and interstellar magnetic field. The best estimate today is that the supersonic solar wind passes

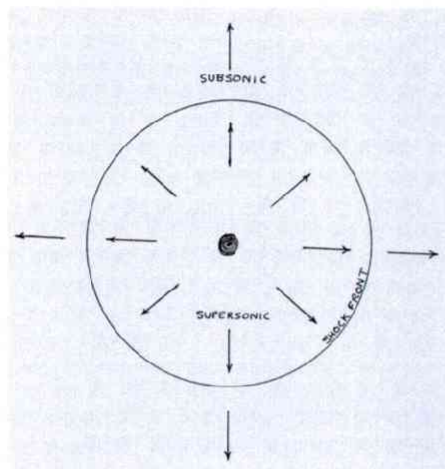


図6 定常衝撃波まで伸びる超音速の太陽風を示す太陽風の図 ($R=100\text{AU}$ の付近に位置すると推測される)。太陽風内のらせん状の磁場は、太陽に近い場所のみに示した。

Fig. 6 A sketch of the heliosphere showing the supersonic solar wind extending out to the standing shock, estimated to lie somewhere in the vicinity of $R=100\text{ AU}$. The spiral magnetic field in the solar wind is indicated only in the region close to the Sun.

ところで亜音速に減速すると考えられています (図6 および図7)。後に、私の学生時代からの友人であるアレクサンダー・デスラー氏が、太陽風が吹く地域をヘリオスフェアと名づけ、今日に至っています。1956年2月23日に発生した、太陽宇宙線を生じるフレアでは、磁場が太陽から放射線状に広がり、火星の軌道を越えて強力な磁場を形成しましたが、太陽風によって形成された磁場の構造がこのフレアで明らかになった要件を満たすことは、すぐに明白となりました。

太陽風によって外側に広がった直交成分の磁場が、太陽系内への宇宙線の侵入を防ぐことから、太陽活動の活発な時期には弱い宇宙線が地球で観測されるのは当然でした。太陽の表面で発生する爆発により、太陽風の中に衝撃波と磁場の擾乱が発生し、宇宙線が磁場の擾乱の中を移動して内側の惑星に到達することはますます難しくなります。これですべてが自然なことで符号したのです。

先ほどお話ししましたように、1958年に書いた最初の論文で、私は太陽風の存在とその発生源は、外へ広がった100万度のコロナだと述べましたが、この論文は2人の著名なレフリーから批判されました。しかし、彼らの批判が具体的なものではなかったために、チャンドラセカール教授がこれを掲載してくれました。その時、私は、一般的な不信感はこの分野の研究者のほとんどが示す反応だということに気がきました。最初に太陽風の存在を確認したのは、旧ソビエト連邦のK・I・グリーンガウズ氏でした。彼は、ルナ2号、3号、そしてヴィーナス3号に搭載された計測機器の観測データか

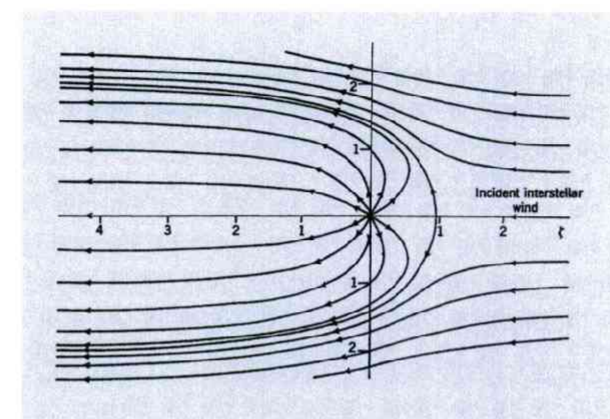


図7 有意な磁場を伴わない亜音速星間風の存在下における衝撃相転移 $r=R$ を超える亜音速、近非圧縮性の星間風の流体力学的流動。距離は、よどみ距離 L を単位として測定する。

Fig. 7 The streamlines of the subsonic, nearly incompressible, hydrodynamic flow of a stellar wind beyond the shock transition $r=R$ in the presence of a subsonic interstellar wind carrying no significant magnetic field. Distance is measured in units of the stagnation distance L .

through a standing shock wave and slows to subsonic speeds somewhere in the vicinity of 100 A.U. , that is to say, at a distance 100 times farther from the Sun than the planet Earth [Fig. 6, 7]. A friend from my student days, Alexander Dessler, later came up with the name *heliosphere* for the region swept out by the solar wind. It is the term in use today. It was immediately evident that this magnetic configuration fulfilled the requirements set down by the solar cosmic ray flare of 23 February 1956 with the field pulled out radially from the Sun and strongly wound around beyond the orbit of Mars.

It was clear that the outward sweep of the transverse magnetic fields carried in the solar wind inhibits the penetration of the cosmic rays into the inner solar system, and, therefore, accounts for the observed reduction of the cosmic ray intensity here at Earth during the years of strong solar activity. The outbursts on the Sun produce shock waves and other disturbances in the magnetic field in the wind, so that it is more difficult for the cosmic rays to move in along the kinky magnetic field to reach the inner planets. So the whole picture fell together in a natural way.

As I mentioned earlier, my first paper in 1958, setting out the solar wind and its origin as the expansion of the million degree corona, was condemned by two

らその存在を確認したのです。この結果、太陽から秒速約100キロメートルを超える速さでイオンが流れ出していることが証明されました。当然のことながら、イオンが流れ出すと同時に同じ量の電子も流れ出していると推測されました。後に、マサチューセッツ工科大学のブルーノ・ロッシ氏のグループは、エクスポローラー10号に高性能のプラズマ観測器を搭載し、イオンの平均速度が秒速約300キロメートルであることを突き止めました。ところがイオンの流れには奇妙な傾向があって、約1時間の間に流れたり、止まったりを繰り返すのです。つまり測定値にあいまいさが残るため、懐疑的な人たちからは決定的な結論として認められませんでした。

そこで次に、カリフォルニア州パサデナのNASAジェット推進研究所のマルシア・ノイゲバウアー氏とコンウェイ・スナイダー氏が、金星探査ロケット、マリナー2号に搭載した観測機器から6カ月間連続で得られたデータに基づき、太陽風の存在を実証しました。太陽風の存在が事実として立証されたのです。地球の軌道における太陽風の密度が1立方センチメートルあたり5プロトンだったことは大きな驚きでした。この結果、イオンの正味の流束は毎秒1平方センチメートルあたりおよそ 2×10^8 になりました。グリーンガウズ氏もロッシ氏もこれとほぼ同じ全流束を測定しており、この数値の妥当性についてはほとんど疑いの余地はありませんでした。意外にも、以前、彗星の尾の加速、黄道光などに基いて算定した数値は1立方センチメートル当たり500から1000でした。残念ながら、流体力学理論では、コロナからの太陽風の密度まで予測できません。それはその密度がコロナの温度上昇にきわめて敏感に反応するにもかかわらず、今日でさえ、ファクター2以上の精度ではほとんど知られていないからです。ですから、1立方センチメートルあたりの密度が5であろうと500であろうと、太陽風の発生源に関する理論には大した影響はありませんでした。しかし、ヘリオスフェアの半径の測定、ならびに地球の太陽を向いた面の磁場が太陽風によって圧迫される程度には、大きく影響しました。エクスポローラー10号がようやく地球磁場の境界に到達した時、断続的に吹く太陽風のせいで、磁場の境界が探査機をはさんで行きつ戻りつしていることが明らかになりました。境界が内側に下がった時だけ、エクスポローラー10号は風上に位置します。境界がエクスポローラー10号を越えて外側に拡大した場合、エクスポローラー10号は地球磁場によって太陽風から遮蔽されるのです。

その後、私は他の星の星風の性質を理論的に予測し、続いて銀河磁場の不安定性に関する力学について研究しました。これは銀河系のガス円盤に因るものです。また、

“eminent” referees, and published by Chandrasekhar because the referees had no specific criticisms. I found that general disbelief was the reaction of most workers in the field. The first detections of the solar wind were made by K. I. Gringauz in the Soviet Union, with instruments on the Luna 2, Luna 3 and the Venus 3 spacecraft. These detections showed a flux of ions from the Sun with speeds in excess of about 100 km/sec. One inferred that the ions were accompanied by an equal flux of electrons, of course. Subsequently Bruno Rossi's group at the Massachusetts Institute of Technology sent out a more sophisticated plasma detector on the Explorer 10 spacecraft and measured average ion speeds of about 300 km/sec, but the ion flow had the strange habit of switching on and off over periods of the order of an hour. So there were enough ambiguities in the measurements that they were not accepted by the skeptics as definitive.

It remained for Marcia Neugebauer and Conway Snyder at NASA's Jet Propulsion Laboratory in Pasadena, California to establish the wind with six months of uninterrupted data from their instrument carried to Venus on the Mariner II spacecraft. The solar wind became an established fact. The big surprise was that the density of the wind at the orbit of Earth was only about 5 protons/cm³, so that the net flux of ions was approximately 2×10^8 /cm² sec. Both Gringauz and Rossi had measured about that same total flux, so there could be little doubt as to its validity. The surprise lay in the fact that previous indirect estimates based on comet tail acceleration, the zodiacal light etc. had favored 500–1000/cm³. Unfortunately the hydrodynamic theory of coronal expansion cannot predict the density of the wind because of the extreme sensitivity of the density to the run of temperature out through the corona, which is hardly known to better than a factor of two even today. So 5 or 500/cm³ made little difference to the theory of the origin of the wind, but it made a big difference to the estimated radius of the heliosphere and to the degree to which the impact of the solar wind compressed the geomagnetic field on the sunward side of Earth. It became clear that the Explorer 10 spacecraft had barely reached the outer of the geomagnetic field, and the intermittent character of the wind represented the boundary moving back and forth across the space craft. Explorer 10 was in the wind only when the boundary had moved inward. When the boundary moved outward over Explorer 10, the spacecraft was shielded from the wind by the geomagnetic field.

Subsequently I speculated on the theoretical nature of the stellar winds of other stars. I explored the unstable dynamics of the magnetic field of the Galaxy, which

磁場を形成すると思われる銀河ダイナモのモデルをいくつか考えました。絶え間なく生まれる宇宙線によって、またおそらくは超新星やそれに関連する現象によって、ガス円盤の中で磁場が秒速約50キロメートルの速さで膨張することに大きな興味を持ちました。そこで思いついたことがあります。それは、銀河磁場の存在により、宇宙におけるかなりの数の磁気単極、すなわち自由磁荷の存在が否定されるということです。なぜなら、自由磁気単極子が銀河磁場をすばやく減衰させるからです。私は、マイケル・ターナー氏やトーマス・ボグダン氏と共に、この問題についてかなり詳しく研究しましたが、銀河磁場の減衰から単極子へたどりつくことができませんでした。したがって、単極子はあるとしても極端に少ないと考えられます。磁気単極子プラズマの振動でも、磁場の減衰という大惨事を回避することはできないでしょう。実は私は、磁気単極子のある宇宙では、現在の銀河磁場を単極子の振動と関連する磁場で説明することが可能であるものの、そのような宇宙では、観測とは対照的に、磁場がプラズマと共に移動しないという珍しい性質があることに気がしました。その代わりに銀河磁場は、移動するプラズマと背景の磁気単極子のプラズマの中間に位置する座標系を移動すると考えられます。実に不思議な世界です。

1972年、私は、乱れた磁力線のトポロジーを持った磁場が緩和し平衡状態に達すると、接触不連続面を形成しやすいということを初めて認識しました。この問題について総合的な理解と視点を得るまでにはずいぶん時間がかかりましたが、ようやく1994年に、“Spontaneous Current Sheets in Magnetic Fields”（「磁場における自然発生的電流シート」）と題する研究論文を発表しました。この研究は実に楽しいものでした。なぜなら、この研究が磁場に関する初級物理学の世界へ私を誘ってくれたからです。ここからは私の想像ですが、不連続面、すなわち電流シート表面における磁気エネルギーの分散は、太陽をはじめとする多くの恒星のX線コロナの生成に大きな役割を果たしているのではないのでしょうか。このように、私たちを取り巻く世界には驚きが尽きることはないのです。

私の好奇心を満たす冒険についてここまでお話しすれば、今日まで行ってきた私の努力について少しはわかっていただけたのではないのでしょうか。これまでの歳月を振り返ってみますと、本当にたくさんの方々から助けていただきました。両親から様々な励ましを受け、先生方からはご鞭撻をいただき、先輩方からも触発をうけました。大学で働くようになってからは、仕事柄、科学的好奇心を満たすことは可能になりましたし、他の人たちと協力して、思いついたアイデアを実証することもできましたし、

is rooted in the gaseous disk of the Galaxy. I worked out some models of the galactic dynamo that presumably creates the magnetic field. I was fascinated by the way in which the field is inflated (at some 50 km/sec) by the continuing production of cosmic rays, presumably by supernovae and related phenomena, in the gaseous disk. Then it occurred to me that the existence of the magnetic field of the Galaxy rules out the existence of any significant number of magnetic monopoles, i.e., free magnetic charges, in the universe, because free magnetic monopoles would quickly dissipate the galactic magnetic field. Michael Turner, Thomas Bogdan, and I looked into the question pretty thoroughly and could find no way to the monopoles from destroying the magnetic field of the Galaxy. So the monopoles must be extremely rare, if there are any at all. Even magnetic monopole plasma oscillations do not avoid the catastrophe. In fact, I found that a universe with magnetic monopoles, in which the present galactic magnetic field is to be understood as the field associated with the monopole oscillations, would have the curious property that the magnetic fields would not move with the ionized gas, in contrast with the observations. Instead, the galactic magnetic fields would move in a frame of reference exactly half way between the moving plasma and the background magnetic monopole plasma. It would be a strange world indeed.

In 1972 I first recognized the tendency for magnetic fields with untidy field line topologies to develop internal surfaces of tangential discontinuity when the fields are allowed to relax to equilibrium. It took a long time for me to develop a comprehensive understanding and perspective on that subject, which I finally published in 1994 as a research monograph, *Spontaneous Current Sheets in Magnetic Fields*. I have enjoyed that pursuit very much because it has taken me into the elementary physics of magnetic fields. It is my guess that the dissipation of magnetic energy at the surface of the discontinuities, or current sheets, is a major player in creating the X-ray coronas of many stars, including the Sun. So the world around us is a never ending source of amazement.

I think this is enough detail on my adventures in curiosity to give some idea of my efforts. In looking back over the years, it is clear how much I owe to the friendly help from so many others. Broad encouragement from my parents, encouragement from my teachers, encouragement from senior colleagues while getting started, a job that allowed me to pursue my scientific curiosity, others who shared incomplete ideas, and a generally congenial scientific atmosphere in which to work. The Enrico Fermi Institute and the Department of Physics, and more recently the Department

気心の知れた同僚との科学的な環境にも恵まれました。シカゴ大学のエンリコ・フェルミ研究所、物理学研究科、そして最近まで勤めていた天文学・天体物理学研究科は、1955年にシカゴ大学に着任してから1995年に退職するまでの40年間、私にとって常に研究の本拠地でありました。私の研究は物理学や天文学の本流ではありませんでしたが、同僚は気の合う人たちばかりでした。

研究生生活を始めた頃は、驚くべき新発見が数多くなされました。例えば、地球の磁場は、液体金属核の対流運動によってのみ形成されること、太陽コロナの温度が100万度であること、100万度の温度が外へと広がること、太陽粒子線が宇宙全体に広がることなどです。ここで強調しておかなければならないのは、その後、驚くべき発見がますます増えていることです。思いつくままにいくつかの例を挙げてみましょう。磁気カーペットという太陽表面の注目すべき構造、太陽内部の対流や回転、磁気を帯びた黒点の珍しいメリジオナル・ラミネーション、太陽圏の境界の構造、太陽核で作られるニュートリノ、ニュートリノの静止質量がゼロでないこと、宇宙における暗黒物質の存在、暗黒エネルギーの存在の予知、宇宙背景輻射などです。さらに不吉なことを申し上げますと、太陽には、外へ向けた磁気活動を半世紀以上にわたって停止する、という不可解な特性があることがすでに分かっています。この現象については、17世紀後半のマウンダー極小期で実証されています。また、地球の気候は、太陽の活動全体から驚くほど大きな影響を受けています。近年、大気圏における人為的温室効果ガスが一因とされる地球温暖化に対して懸念が高まっており、差し迫った環境の変化に合理的かつ有効に対処するうえで、地球気候に影響を及ぼす様々な要因への理解が緊急の課題となっています。

妙な話ですが、『サイエンティフィック・アメリカン (*Scientific American*)』の編集者の1人が、数年前、物理学の終焉について書いた本を発表しました。ご覧になった方がいらっしゃるかもしれません。その言わんとしていることは、今から20年後、ひも理論が何かの理論が基本粒子理論を完成させた時点で、物理学に残された課題はなくなり、この学問は役目を終えるというものです。この本は、知的好奇心の強い人たちの間で人気を博し、ベストセラーになりました。著者は100万ドル以上の印税を手にしたにちがいありません。まちがいなく、著者は実に頭のよい人物です。ただし、この本の基本的な考え方は、あまりにも現実とかけ離れています。その根拠として、少なくとも次の2つの点を挙げることができます。1つは、この数十年の間に、実に多くの科学的な謎が新たに出現したことです。この点については、すでに具体的

of Astronomy and Astrophysics, of the University of Chicago have been my intellectual home for the forty years between my arrival in Chicago in 1955 and my retirement in 1995. My colleagues have been congenial companions along the way, even though my work has been outside the mainstreams of physics and of astronomy.

I entered research at a time when there were many astonishing new discoveries, e.g., the recognition that the magnetic field of Earth can originate only in the convective motions of the liquid metal core, the million degree temperature of the solar corona, the enormous outward extension of the million degree temperature, the universal solar corpuscular radiation, etc. Then it should be emphasized that the rate of appearance of astonishing discoveries has increased since that time. There is, for instance, the remarkable structure of the magnetic carpet on the Sun, the remarkable internal convection and rotation of the Sun, the peculiar meridional laminations of the magnetic sunspots, the structure of the outer heliosphere, the neutrinos from the core of the Sun, the nonzero rest mass of neutrinos, the existence of dark matter in the universe, the recent inference of dark energy, and the inhomogeneities in the early universe that left their mark on the background thermal radiation, to mention some of the discoveries that spring immediately to mind. On a more sinister note, the Sun has revealed the mysterious property of shutting down its outward magnetic activity for half a century or more, as exemplified by the Maunder Minimum in the second half for the seventeenth century, and it has become clear that terrestrial climate tracks the general level of solar activity to an amazing degree. The present concern with global warming here at Earth, driven in part by the accumulation of anthropogenic greenhouse gases in the atmosphere, brings an urgency to understanding the diverse drivers of terrestrial climate if we are to react rationally and effectively to the impending environmental challenge.

It is curious that one of the editors of *Scientific American* a few years ago wrote a book proclaiming the end of physics. You may have seen it. The thesis was that in another twenty years, when string theory, or whatever, finally accomplishes the theory of fundamental particles, physics will be finished, with nothing more to do. The book was eagerly read by the intellectual public and was a best seller. The royalties to the author must have been of the order of a million dollars or more. The author is clearly one very smart cookie. Yet the basic idea of the book is naïve in the extreme, for at least two obvious reasons. One is the great number of scientific mysteries that have emerged in recent decades. I have just mentioned

な例をいくつか挙げましたが、物理学的に取り組み甲斐のある面白い問題が、生物学の分野からも提起されていることは喜ばしいことです。物理学の限界など、予測できるはずはありません。

2つ目の根拠は、基本粒子に関する数学上の基礎理論ができあがれば、もはや物理学で解決すべき課題は何もないと著者が主張していることについてです。ニュートンが力学の法則や万有引力の法則を発見した300年前を振り返ってみましょう。彼の発見は、問題の始まりであって、終わりではなかったことがわかります。惑星、恒星、そして銀河に関するニュートン力学については、あれから300年を経た今日でも、盛んに研究が行われているからです。マクスウェルは、1865年頃、電磁方程式を完成しました。これも電磁理論の始まりであって、終わりではなく、実験と応用が繰り返され、140年近くたった今でもなお研究が続けられているのです。アインシュタインは1916年に、相対論的重力場の方程式をまとめました。この分野は、約90年後の今でも勢いを増しています。1926年から1929年にかけて、シュレーディンガー、ハイゼンベルグ、ディラックらは、量子力学の基礎となる方程式を完成させました。これも量子力学と原子物理学の始まりであって、終わりではないのです。つまり、理論学者が2020年までに基本粒子に関する理論を定式化できたとしても、素粒子物理学の新時代が終わったのではなく、始まったと考えられるのです。

ですから、皆さんがご自分の周りの世界に興味をもたれたのなら、物理学は予見可能な未来への心躍る期待感を提供してくれます。ただし、他にも魅力ある学問分野があります。若い人たちにとって一番大事なのは、自分が最善を尽くすことのできるものを見つけることです。興味を引かれるものこそ、最善を尽くせることなのです。ですから、興味があることを探しましょう。皆さんが見つけたことがご自分にとって本当に興味のあることだとわかれば、そのことに対して真剣に努力すべきです。私の場合、十代の頃は短編小説の作家になりたいと思っていました。そこで私はやってみたのです。1年ほどの間に、たくさんの短編小説や長編小説を書いてみたのです。すると、すぐに私にはこの仕事に向いていないことがわかりました。そこで小説以外の数学や物理学に目を向けたのです。純粋数学の抽象的概念を研究するだけの能力が私にないことは一目瞭然でした。最善を尽くすことのできたのは、幾何学や押し引きといった物理学の基礎理論でした。そしてこれがきっかけとなって、私は理論物理学の世界へ進んだのです。

私と同じように、皆さんも多くの方から励ましを受けられるよう望んでいます。し

a few of those mysteries, and it should be appreciated that biology is beginning to pose challenging and interesting problems in physics as well. No limits can be foreseen.

The second reason is the assertion that, when the basic mathematical theory of fundamental particles is constructed, there will be nothing left to do in that field. Now if we look back three hundred years to Newton's formulation of mechanics and gravitation, we see that that it was only the beginning, not the end, of that subject. The Newtonian mechanics of planets, stars, and galaxies is an active field of investigation today, three hundred years later. Maxwell wrote down the complete electromagnetic equations around 1865. That marked the beginning, not the end, of electromagnetic theory, with experiment and application, rushing ahead today, nearly 140 years later. Einstein wrote out the relativistic equations of gravitation in 1916, and the field seems to be still gaining momentum nearly 90 years later. Schrödinger, Heisenberg, Dirac, et. al. wrote down the basic equations of quantum mechanics in the period 1926-1929. That was the beginning, not the end, of quantum mechanics and atomic physics. So if theoreticians can formulate fundamental particle theory by 2020, we can look forward to the beginning, not the end, of a new era in particle physics.

So if you find yourself curious about the world around you, physics offers exciting prospects for the foreseeable future. But there are other fascinating subjects as well. The most important thing that a young person can do is find out what he or she does best. What interests you is the best indicator of what you might do best. So explore your interests. A serious interest deserves a serious effort if you are to know whether it is right for you. For instance, in my teens I thought it would be exciting to be a writer of short stories. So I tried my hand at it, writing many short, and not so short, stories over a period of a year or so. It was soon evident that I was not very good at it. So I looked elsewhere to mathematics and physics. I soon discovered that I have no particular ability with the abstract concepts of pure mathematics. It is with the physical concepts of geometry and of push and pull, on which physics is based, that I do best, so I followed that lead into theoretical physics.

I hope that you receive as much encouragement along the way as I have. On the other hand, you will surely run into discouragement at times, perhaps from parents, or teachers, or your peers. So you have to decide for yourself ahead of time whether you are really serious in your pursuits. If you are not determined,

かし、時には落胆することもあるでしょう。その原因が両親にあることも、教官にあることも、同僚にあることもあるでしょう。ですから、自分が本当にその学問を研究したいのかどうかを、あらかじめ見極めておく必要があります。本気でそう思っていないのであれば、自然科学の研究はあきらめたほうがよいかもしれません。逆に、真剣に研究を続けたいのなら、他の人からその決断について何を言われても、躊躇してはいけません。また、誰かに一歩先んじられたとしても、あきらめてはいけません。長い目で見れば、進歩は皆さんや皆さんと同じ分野で研究を続けている他のすべての人たちの実力を高めてくれるはずです。ですから、ご自分の研究成果を発表することになって、レフリーが皆さんの論文を完膚なきまでに否定したとしても、驚いてはいけません。レフリーに論文を批判されたら、そのことについてよく考えてみてください。レフリーの言い分にも一理あるかもしれません。皆さんとしては、自分が本当に間違いを犯したのであれば、真っ先に教えてほしいと思うでしょう。そんな時は、『アストロフィジカル・ジャーナル (*Astrophysical Journal*)』の編集者をしていた当時のチャンドラセカール教授のアドバイスを思い出してください。どんなにひどいレフリーの報告書にも貴重な情報はあります。なぜなら、それを読めば、あなたの論文に対する標準的な読者の反応がわかるのですから。ひょっとすると、皆さんは、ご自分の論文を一部書きなおしたり、強調したり、あるいは論旨を明快にしないといけないかもしれません。

生物科学であれ物理学であれ、科学という学問には様々な研究方法があるということをお話ししておかなければなりません。まずは、ご自分の専門分野についての知識を習得する必要があります。皆さんがその分野に本当に興味を持っておられるのであれば、この作業は実に楽しいはずです。次に、実験によって知識をさらに広めることが自分に合っているのか、それとも理論によるほうがよいのかを見極めなければなりません。いや、現在知られている知識を解説することに長けている方もおられるでしょう。もっとも、これは多くの研究者があまり得意ではない分野です。ひょっとすると、初等または高等教育機関で教えることで、あなた自身が最も輝くことができるのかもしれません。同僚の目を気にして決断を下してはいけません。たとえ周りから何を言われようとも、平凡な研究者になるよりも、優れた教育者であるほうがはるかに素晴らしいのです。

最後になりましたが、これまでお話ししたことが、私の人生の科学者としての一面であることは申すまでもありません。私としては、それが人生の半分にすぎないこと

maybe you should not pursue hard science. However, if you feel strongly about your subject, then do not falter because someone criticizes your decision. Similarly, if someone gets ahead of you with inspired research, do not be discouraged. In the long run progress serves only to boost you and everyone else working in the field. Then do not be surprised by destructive referees when you come to publish your scientific achievements. If a referee is critical, think about it carefully. The referee may have a point, and, if you really made an error, you want to be among the first to know. And remember the advice of Chandrasekhar, from his days as editor of *The Astrophysical Journal*, that even the worst referee's report contains valuable information, because it shows you the reaction of a typical reader to your written words. Perhaps you need to modify, re-emphasize, or clarify some point in your writing.

I should remark that science, whether biological or physical, can be pursued in many ways. To begin, you must become knowledgeable in your chosen subject. That should be a pleasure if you are genuinely interested in it. Then you have to decide whether extending that knowledge through experiments or through theory is your strong suit. Or are you better at expounding existing knowledge, something at which many researchers are not so proficient? Perhaps you shine brightest as a teacher at an elementary level or at an advanced level. Do not let peer pressure make any of these decisions for you. There is a lot more glory in good teaching than in mediocre research, in spite of what some may try to tell you.

Finally, in closing, it is obvious that the foregoing exposition has dealt with the scientific side of my life. I would like to emphasize that that is only half of my life. The other half is the personal side. When I was a student at MSU, I developed the habit of working twelve hours a day, seven days a week on my studies, with little exception. My father pointed out to me that too much of anything is not good. He suggested that I should learn to be the master, not the slave, of my chosen profession. I gradually took this to heart, and I comment now that no one should neglect developing the personal side of life. It is your personal relationship to others, concentrating on immediate family, that carries you along through the years and decades ahead. That means applying a substantial fraction of your time and effort day by day to those relationships. Your profession may be exhilarating, but it is not sacred, and the exhilaration will not go on forever. You will find that diverting time and energy to personal relationships helps you to free your mind for a fresh look at your work. So you need to develop a deliberate balanced life style if you

を強調しておきたいと思います。残りの半分とは、私個人としての部分です。ミシガン州立大学在学中、私は、週7日、1日12時間を研究に費やすようにしていました。そんな私に父は、何事もやりすぎはよくないと忠告してくれました。そしてこうも言ったのです。自分の選んだ職業の奴隷ではなく、主人となる術を身につけなさいと。時が経つにつれ、父のこの言葉は私の心に深く刻み込まれていきました。ここで皆さんにお伝えしたいのは、一個人としての人生をないがしろにしてはいけないということです。これまでも、そしてこれからも、皆さんを支え続けてくれるのは他の人たち、とりわけご家族の方々です。ということは、こうした周囲の人たちとのつながりに、日々多くの時間と努力を費やす必要があるのです。仕事をしていると楽しいかもしれません。しかし、仕事は神聖で侵すことのできないものではなく、そこから得られる喜びが永遠に続くわけでもないのです。ご自分の時間やエネルギーを他の人たちのために費やすことで、自由な発想が得られ、仕事に対する見方も変わってくるでしょう。充実した人生を過ごしたいのであれば、よく考えたうえで、バランスのとれたライフスタイルを確立すべきです。特に好奇心や興味に対するご自分の考え方をお子さんに伝えておきましょう。そうすれば、いつの日か皆さんのお子さんが天職につくことができるかもしれないのです。

are to enjoy a satisfying life. In particular, pass on your concept of curiosity and interest to your children that they may one day be successful in choosing their own life work.

稲盛財団 2003——第19回京都賞と助成金

発 行 2004年11月10日

制 作 財団法人稲盛財団

京都市下京区四条通り室町東入ル函谷鉾町88番地 〒600-8009

電話 [075] 255-2688

ISBN4-900663-19-0 C0000