

惑星地球周辺と宇宙の電磁波について

A GLANCE
OF
PLANET EARTH AND ELECTROMAGNETIC WAVES

中 村 重 久
Shigehisa Nakamura

2 0 0 7 November 2 0

まえがき

京都大学では、1960 年、日本で最初の海洋観測塔を太平洋に面した和歌山県白浜沖に設置した。これには、当時の社会的必要性もあって、京都大学理学部教授であった速水頌一郎による研究計画に対する文部省予算措置によって実現したものである。それから 40 年以上たつて、人工衛星の時代となっても、この白浜海洋観測塔は、なお、その役割を十分に果たしている。

さて、ここで、この 21 世紀のはじめの、およそ 10 年というのは、科学技術の大きな進歩発展が見られるときであると考えられる。その進歩発展は、科学および技術の多方面にわたる分野において認められるものといつてよいであろう。技術の進展が、科学の発展をうながし、その全貌を、すべてにわたって述べることは容易ではない。ここでは、その限られた範囲での問題についての概観を述べることにしよう。

1900 年代(20 世紀)においては、優れた科学者が輩出し、とくに、物理学の面で、その傾向が顕著であった。たとえば、ニュートンの古典力学から、量子力学の進展や相対性理論の発表などは、その代表的な例である。理論的な展開のあとには、その応用面みられと実証への道が伸びていくことになる。その応用は多方面のわたると考えられるが、理論が実際に、実証の対象となるまでには、しばらく、時間の経過が必要であった。1900 年代も後半になると、科学者の数も増えて、物理学の分野で、量子論や相対論が中心的な課題としてあつかわれ、それまで物理学で研究の対象であった問題は、宇宙物理学あるいは天文学および地球物理学の分野として扱われるようになった。1950 年くらいまでは、天文学も、ケプラーやニュートンの物理学によって、ひきつづき研究されたが、物理学の分野において宇宙線の問題が現れると、物理学と天文学との接点が明らかになり、星の光の問題が、電波天文学とよばれる問題と移行していくことになる。さらに、X 線天文学となると、かつての、記述的な天文学は、新しい物理学の側面をあらわすようになってくる。

このような経過をへて、われわれは、地球の誕生の歴史を科学的にたどろうとする道をとる。さらに、地球を含む太陽系、銀河系、さらには、宇宙の誕生の歴史を物理学の眼で見ようとすることになる。地球の外部からの宇宙線に関連して、ニュートリノの観測なども、重要な意義を持つことになるわけである。

人類が地球上に生活をしているかぎり、歴史時代よりも古い時期のことも知りたいようになることは当然のことかもしれない。未知のことについての関心が強いことは、人類の心の向かうところである。地球上の大気や海洋のみならず、人類の歴史と未来とを考えることである。

ここに、地球とその周辺の現象や事象についての概観を紹介して、参考に供することが必要となる。ここでは、記述が、簡潔になっていて、内容に分かりにくい部分があるかもしれない。また、ある部分は、詳細にわたる記述となつて、読みにくいかもしれない。ここでは、とりあげた問題についての、手がかりとなるようなものとなるような表現にしたつもりである。その一方で、最新の情報も盛り込もうとした。このようなことで、文章のバランスが十分にうまくとれていない点がある。さらに、また、別の資料などを参考にされることを希望している。

本文が、なにがしかの参考になるところがあれば、著者として、幸甚なことである。

2007 年 11 月 20 日

元 京都大学 白浜観測所長

Foreward

This is aimed to give a simple glance of the environment of the planet earth. Several recent works are introduced for helping what stage is at present in the scope of science.

The planet earth is the home land for our humankind and for all of the living animals and plants. Nevertheless, we know only a little part of the nature of the earth. At present, our life is in our fine life under a well arranged environment of electromagnetic waves.

In the old days, electricity had been taken as local natural phenomena though some recent research suggests that the lightning is a part of the global system in the atmospheric layer on the earth surface. Benjamin Franklin was the pioneer to our use of electricity for our modern life.

In these recent years, we have had a more convenient functions and products for our life. We are utilizing electromagnetic waves for our life. Although, we, most of the human kind have take it to be our recent life should be more convenient.

In this writing, the author introduces first a glance of the planet earth in a scope of a classic view point. So, this part might be easy to understood for those of students even in the outside of physical science.

Physics has contributed to give us various kind of applications after compiling of the findings of the facts and developing their theoretical understanding.

Now, our life is in the environment of electromagnetic waves. Recent cell-phone distribution is one of the example, though it has been made practical use after establishing a system for the purpose of technological industries.

However, we have to be aware of what is the nature on the earth as well as that of the environment of the planet earth. Astronomy has been descriptive, though recent researches have had revealed that the cosmic ray on the earth was an incident electromagnetic wave. Astronomical observations have led to develop "Radio-Astronomy", "X-ray Astronomy", and "gamma-ray astronomy". These developments have given a key to see about the age of our space.

Our interest about the age of the planet earth is well estimated in the recent scientific contribution. It is familiar us what about the solar system. A knowledge about the milky way has been updated and has been noticed where is located the solar system in the galaxy. Many galaxies have been found. Black holes have been observed.

All of the recent observations are depend on the advanced instruments with an high resolution and a more precision in accuracy. These are promoted by application of electromagnetic waves.

Now, we are at the entrance to glance the recent knowledge of the planet earth's environment.

Some part might be noted in a brief note and some other part must be written to details at the author's interest. A more advanced finding can be found when those would refer to those what have be presented by the experts.

The author can give to a reader a key to glance the planet earth's environment here. He is expecting to find each of those who read this might grow up to be a scientist or to be a citizen of knowledge in his life.

Director(Retired), Shirahama Oceanographic Tower, Kyoto University

20007 November 20

PREFACE

In the first ten years of the new century, we are in a stage of the advancing science and technology. We can find new phases of the advanced science and technology. The science with the advanced technology suggests us a key to open the new gate way for our welfare and life on the earth in future.

In the last century, the 1900s, the leading scientists in physics had introduced quantum theory and relativistic theory. Those theories had been developed by using or applying mathematical techniques in the first half of the last century, and these theories resulted to study various researches in the new sections of physics.

The scientists of physics had increased in the last half of the last century. A section of physics was separated into several subsections, that is to say, a subsection as the new one was named "geophysics". This section has covered what part of "physics" in the 1800s. In those days, the section of "astronomy" was working simply in the observation of the planets belonging to the solar system even though Kepler and Newton had their dynamics for realizing the planets' motion around the sun in the solar system. History tells us that the section of "astronomy" has been descriptive and those of human living on the earth had constructed "a spherical ceiling" on which the planets and stars had been moving in a cyclic. A finding of a cosmic ray was a key to light up what have been left to be solved in "astronomy". There have been many stars radiating signals.

It has been our interest to know when the earth was appeared in the space and when the space in the world is formed. Adding to that, it is a strong interest to see when the space gets to its final stage.

Those of the human being living on the earth have a strong interest about prehistoric process of the earth and the space.

Now, it is the time to give them a shortened introduction to physics of the earth and space. There might be some part to the details and the other part might be in a brief note. Even it is so, a glance can be found by the readers to be updated.

The aim of this is to give the reader a key to get a more detailed knowledge of the planet earth and the space.

Shigchisa Nakamura

第1部 惑星地球周辺の古典的記述

1. 地球と宇宙の間

私たち、人類は、地球で生活している。その人類の生存は、地球上の多くの生物の生存と連携していて、そのつながりかたは複雑である。人類は、その複雑さを認識しているかどうかには関係なく、あたりまえのように、地球上で長い年月の間、何代もの世代をかさねてきて現在にいたっている。

私たち、人類も、その他の地球上の生物も、生存を継続させるために、生まれ、そして、死んでゆくことを、これまで繰り返してきた。人類は、“万物の長である”とか、“霊長類”であるとかいう言葉もある。これは、地球上の生物のなかで、人類は、“自分で考え、自分で発見し、自分で発明する”ということが出来るからであるという表現もあるくらいである。生物発生の痕跡は、現在判明しているだけでも、世界各地に、多く残されていて、その詳細については、関連の専門分野の知識にたよるほかはないが、すくなくとも、人類発生からおよそ48億年といわれる長い歴史のあいだに、生物学的な進化といろいろの経験との集積の結果として獲得したと考えられる。

人類というものは、自然についての関心がつよいが、それも生存のためであるといってしまうえば簡単であるようにみえる。しかし、人類の未知のことがらについて強い関心をもっていることも事実である。人類のとりまく周囲の環境を“自然”と称してきた。おそらく、当初の段階では、ごく身の回りの範囲についての事象についての漠然とした概念を、“自然”という言葉でとらえていたものであろう。

さて、人類が、個体それぞれのみではなくて、複数の個体の集合体となってくると、関心は、さらに広い範囲の空間に向けられ、その時間的变化が、生存上、重要なことであることが分かってくる。人類をとりまく空間は、現在では、宇宙空間という広大な空間のまで拡大されていて、その期限を知ることへの関心もつよく、その関心と疑問への回答をもとめて科学や技術の進展がみとめられた。また、宇宙空間の限界を知ることに関心の的である。

このような宇宙空間と地球とのあいだについては、多くの未知の事実があるはずであるものと考えられるが、その未知を“発見”することが、“自然科学”とよばれる分野であろう。その発見のための手法は技術とみられ、また、発見にもとずいた事象を人類のために有用なものとして役立てる手法を見出すのが“発明”といわれるものである。

現在では、宇宙の歴史は、約148億年であるということが、広く語られるようになった。これも、科学と技術との進展によるものといつてよいであろう。あるいは、発券と発明の歴史が、現在の人類の思想と生活を支えているといつてもよいであろう。

それでは、地球と宇宙との間について、どれだけの知識の集積があるのであろうか。ここで、その概要をみれば、2007年現在の情報にいたる道程のあらすじもわかるであろう。

2. 地球から銀河まで

人類は、歴史時代をみると、古代には、天と地と人によって基本的な自然観の概念をとらえていたようである。これは、日本だけではなくて、東アジア大陸の東部に拠点を置く中国のみならず、ヨーロッパ世界のギリシャおよびローマでも、また、チグリス-ユーフラテス川の流域のペルシャでも、あるいは、中南米でも、同様であるとみられる。

人類が住んでいるところは、平面の土地ではなくて、球形であるという認識は、ヨーロッパの中世には、芽生えていたようであるが、当時の中世キリスト教世界では、容易に許容されるものではなかった。ポーランドのニコラス-コペルニクス(1473-1543)は、1491-1494の期間、クラコフ-アカデミーにおいて天文学を学んだあと、イタリアのボローニャ大学、パドバ大学、フェ拉拉大学などで天文学のほか、医学および法学を学び、法学博士の学位を取得した。中世ヨーロッパ世界ではキリスト教の教義にしたがった概念として“天動説”が広く容認されていたが、コペルニクス(1543)は、“地動説”をとらえた。このことが、のちに、ドイツのヨハネス-ケプラーの天体力学(1609-1618)およびイギリスのアイザック-ニュートンの古典力学および万有引力の概念(1666-1687)のひきがねとなった。

天動説は、地上から見た天空を半球として、その球面を恒星が形成する星座が移動するということで実用的に便利な面があるが、惑星の存在を説明するには、地球の概念が必要となり、太陽系の存在が必要となった。一方、日食および月食の説明には、月が地球の衛星であるとしなくてはならないことも分かってきた。さらに、海岸で認められる海水位の昇降が、とくに、太陽と月の影響によることも明らかになり、地動説が否定できないようになった。

地球と月の自転の関係によって、月の同じ平面のみを見ることができ、その裏側を直接みることができない。しかし、2007年の現在では、人工衛星をうちあげて、月の全表面の観測調査が可能な時代となっている。また、火星探査も実施され、これまで以上に詳細な情報の取得ができる。このような意味で、宇宙科学の時代という表現もあらわれるようになった。

ところで、太陽の研究が進むとともに、光学的な観測による天文学は、電波天文学の時代になる。高感度の電波望遠鏡を用いると、星のない黒い空間から電波が来ることも分かる。電波の特徴から、X線天文学という研究分野もあらわれた。これまでの研究成果からみると、このような宇宙からの電波の発生には、いろいろの要因があることが分かっている。

たとえば、銀河系において、太陽の5~8倍くらいの超新星が爆発したあとの残骸が電波の源のひとつである。星間ガスによっても電波が放射される。銀河の中心に近いところでの爆発的現象(クエーサー)においてジェット状に放出された高エネルギー粒子もある。銀河系の中に太陽系はある。さらに、銀河系では、クエーサーのジェットの先のほうに、さらにひろがった電波銀河とよばれる領域もある。

3. 地球について

私たち、人類は、地球上で生活している。しかし、その地球についての知識は、それほどものではない。一般的に知られていることは、地球は太陽の周囲を回っているということであり、月は地球の周囲をまわっている衛星であるということである。

ここでは、もう少し、地球についての知識を、これまでの科学研究の成果などをもとに、まとめたものを紹介してみたい。詳細については、それぞれの専門的な資料などを参照されると好都合である。

最初に述べておくべきことは、地球の形状とその大きさである。これについては、たとえば、毎年刊行される理科年表(国立天文台編)に記載されているので、あらためて記述することもないであろうが、なにかの便宜のために、ここには、その要点のみを表記する。

地球の形状などについては、これまで、測地学という分野で、詳細な研究がすすめられて、その成果は、すでに、古典的な科学的学術体系のひとつとなっている。

かつて、ヨーロッパのある地点と、その真南にあるアフリカのある地点とで、同時刻に、太陽南中時における地平線に対する太陽の高度を計測したところ、その高度が異なることから地球の形状が球形であり、その大きさが推定されたというエピソードがある。19世紀(1841)、ベッセルによれば、地球の赤道半径は6377.397km(a)、極半径は6356.079km(b)とされている。地球は回転楕円体とみれば、その扁平率“(a-b)/a”は“1/299.15”である。また、たとえば、北極から赤道までの距離は、“10000.856”である。

20世紀になって、科学的な情報が増加し、技術的にも高精度の観測が可能となってきたため、観測成果の理論的な検証も高度に進展した。このような背景をもとにして、天文学的観測成果の評価の信頼度にも、国際天文学連合(IAU)の決議によるところが大きくなってきた。

20世紀になってからの、信頼すべき、地球の形状と大きさとは、IAUの決議によるものが、日本では、理科年表に記載されている。

定義定数として、ガウスの引力定数“ $k=0.01720209895$ ”と光速“ $c=2999792458\text{m/s}$ ”があるけれど、たとえば、光速は、近似的に、“ $3 \times 10^{10}\text{cm}$ ”として利用される例が多い。

地球は自転しながら太陽の周りの楕円軌道上をおよそ365日で回っているが、正確な表現では“365.2422日”を“1太陽年”として周回しているということになる。日常生活で用いる暦の上では、4年に一度の舊年を設けたり、うるう秒修正をしたりしている。けれども、人工衛星の打上計画などには、たとえば、地球からはるかに遠くにある恒星からみた“1恒星年”などを利用しなくてはならない場合もある。

4. 惑星について

私たち、人類は、地球上で生活している。その地球は、太陽の周りを周回している惑星で、そのほかにも、太陽のまわりを周回している惑星があることは、すでに、古くから知られている。しかし、その惑星についての知識の要点を、ここでまとめておくことにする。

この惑星は、太陽のまわりを周回する天体のことである。この天体には、太陽に近いほうから、水星、金星、地球、木星、土星、天王星、海王星がある。これらの惑星を“太陽系”としている。2006年には、冥王星は、太陽系から除外されるかどうかという議論が沸き起こって、世界中の天文学専門的評価から学校の教科書の表示にいたる広い範囲で、多くの人々を騒がせる結果となった。これは、天文学的には、冥王星(Pluto)の軌道が、その他の惑星の軌道と比較してみると、海王星の軌道の外側にあつて、傾斜が大きいという特徴に原因があつた。一方、冥王星は、アメリカ合衆国の学者が発見した唯一の惑星であるという事情にも関連していた。

水星は、太陽に最も近い起動でまわっている。そのつぎに太陽に近い軌道をまわっているのは金星である。この金星については、日本では、宵の明星あるいは明けの明星とよばれている。地球は、金星よりも外側の軌道をまわっていて、金星と火星との中間の軌道である。これらの惑星を内惑星とよぶことがある。これに対して、外惑星とよばれることのある天体は、太陽に近いほうから、木星、土星、天王星、海王星ということになっている。

これらの太陽系に属する惑星の特徴は、それぞれの天体としての定数で表される。ここでは、その一部のみを、以下に表示してみる。

	太陽の 輻射量 (地球=1)	視半径	赤道半径 (km)	赤道重力 (地球=1)	体 積 (地球=1)	衛 星 数	質 量 (地球)=1	密度 (g/cm ³)	自 転 周期 (日)
太陽-Sun	—	15'59."64	696000	28.01	13040000	—	332946.	1.41	25.38
水星=Mercury	6.67	5.49	2440	0.38	0.056	0	0.05527	5.43	58.65
金星-Venus	1.91	30.16	6052	0.91	0.857	0	0.8150	5.24	243.02
地球-Earth	1.00	—	6378	1.00	1.000	1	1.0000	5.52	0.9973
火星-Mars	0.43	8.94	3397	0.38	0.151	2	0.1074	3.93	1.0260
木星-Jupiter	0.037	23.46	71492	2.37	1321	16<	317.83	1.33	0.414
土星-Saturn	0.011	9.71	68268	0.94	755	18<	95.16	0.69	0.444
天王星-Uranus	0.0027	1.93	25559	0.89	63	15	14.54	1.27	0.718
海王星Neptune	0.0011	0.04	24764	1.11	58	8	17.15	1.64	0.671
月 Moon	1.00	15'32."58	1738	0.17	0.0203	—	0.0123	3.34	27.3217

5. 天体としての地球と月について

地球も、月も、いずれも、太陽系を構成するひとつの惑星であり、天体である。

1. 地球表面の緯度—地球の形状は、正確には複雑なものであるが、天文学的には回転楕円体としてみる例が多い。このとき、地球の子午線の形状は楕円となり、地球の極に比べて赤道側にふくらみがある。このふくらみのために、地球断面の形状を楕円(e)に内接する円(c)によって近似するとき、“c”における緯度(地心緯度)と“e”における緯度(地理緯度)とのあいだには一定の差があらわれる。

2. 歳差—地球の赤道部のふくらみにはたらく月と太陽の引力の影響で、地球の赤道面は、絶えず動いている。地球の回転は、完全に自転軸と一致しているわけではなくて、南北両極のまわりを移動している。天動説におけるように、地球上の一点に立ち、その水平面上で天球を考えると、天の北極も天球上を移動するが、その動きは黄道の極のまわりの、黄道の傾斜角を一定とする周期約26000年の回転(日月歳差)と、振幅約9°の周期的な動き(章動)とに分けられる。また、黄道も地球と月にはたらく惑星の引力の影響で動いている。この動きを惑星歳差とよんでいる。日月歳差と惑星歳差との合成を一般歳差とよぶ。

3. 極運動—地球自転軸は時間的に変化している。この運動は、地球の地理的北極の周辺で確認されるものであり、この極運動は、上記の歳差うち、惑星歳差に相当するものと考えてもよいであろう。

4. 月の特徴—天体としてみた月には、太陽、地球などのような惑星に同様な特徴がある。すなはち、月の公転は、およそ27.3日を周期(恒星月)とするものである。また、恒星からみた月の自転周期は、1恒星月に等しい。すなはち、地球自転の1か月に近い。詳細については、ここでは省略する。

5. 月食—太陽に対する地球の公転軌道と、地球に対する月の公転軌道との双方をかんがえるとき、地球および月の軌道上における相互の時間的位置関係によって、太陽光による地球の影が月面にあらわれる。これを月食という。月食は満月に近い夜に見られる。

6. 日食—上述の月食と同様に、太陽に対する地球の公転軌道および地球に対する月の公転軌道上において、太陽光による月の影が地球上にあらわれるとき、これを日食という。この日食には、太陽、地球および月の相互の位置関係で現象としての特徴が認められる。地球上のある地点に立って、この日食を観るとき、月が太陽光を完全にさえぎる皆既日食、太陽の中心部のみが月の影の範囲となり環状の太陽がみえるような金環食は、典型的であり、古代の天文現象が人類にとって自然宗教的存在であった時代には、凶事の前兆とされた例も多数認められた。月が太陽面からの直接光の一部だけをさえぎるような例では、地球から見て、部分食の状態となる。日食の観られる位置と日時は予測できる。たとえば、日本では、毎年発行される理科年表(国立天文台編)が参考になる。

6. 天体としての太陽について

地球も、月も、その他の惑星も、いずれも、太陽系を構成する惑星であり、天体である。ここでは、太陽について、その概要を述べて、参考に供することを考えた。

1. 太陽の天体としての特徴—太陽の形状は、正確には複雑で、時々刻々変化しているが、最初に、古典的な太陽の特徴の記述を紹介する。太陽の半径は、 $6.960 \times 10^8 \text{ m}$ であるが、これを、概略、 $7 \times 10^{10} \text{ m}$ とすれば便利なこともある。質量は $1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$ 、平均密度は $1.41 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ である。表面重力は $2.74 \times 10^2 \text{ m/s}^2$ であり、有効温度は 5780 K である。地球に対する太陽の自転周期は、25.38日である。

2. 太陽面の諸現象—太陽表面に顕著な現象としていろいろなものがある。たとえば、光球(6000 K)については、黒点(磁場2000ガウス、大きさ1~3万km、寿命6日~2月、4800Kの暗部)のほか、白斑(磁場1000ガウス、大きさ~200km、寿命~10分、光球より数百度高い)、それに、粒状斑や振動斑(太陽の固有振動5分周期、大きさ3000km~太陽全面、光球と同じ温度)などがある。また、彩層については、羊斑(平均磁場50ガウス、大きさ15万km、寿命1~6月)のほかに、フレア(電子密度 $\sim 10^{13}$ 個/cm³、大きさ1~3万km、寿命数分~数時間、温度 $\sim 10^4 \text{ K}$)などの現象が認められる。コロナ域については、紅炎(幅5000km、長さ3万km、寿命数分~数か月、温度 $\sim 7 \times 10^3 \text{ K}$ 、電子密度 $= 10^{11}$ 個/cm³、磁場5~100ガウス)のほかに、電子密度、大きさ、寿命、温度などによって、フレア、コロナ流線などとよばれる現象が認められる。これらの現象の特徴として太陽輻射エネルギーの波長に対応した輝線や連続光が認められるが、その詳細は、ここでは、専門分野の著書および出版物などの記載を参考にされたいことを望む。

3. 太陽のウォルフ黒点数—太陽活動は絶えず変動していて、太陽内部では、核融合および核分裂という核反応が激しいことが分かってきている。この太陽活動の消長を示す指数として“ウォルフ黒点数”の時間的な変動が検討される例が多い。太陽活動は、およそ22年周期の変動であるとされている。一方、ウォルフ黒点数の1600年から現在までの変動をもとに、いろいろの研究や解析がされてきている。その結果によれば、確定的とは言えない面もあるが、この黒点数の数百年にわたるデータにはおよそ11年周期の特徴があるといわれている。この周期的変動は、地球上の諸現象にも影響を与えていることは、これまでの時系列的相関性の特徴から、確実であるものと解釈されてはいるが、どのような過程によってこのような変動特性の伝達が可能となっているかについては、いまだ、不明な点が多数ある。現在のところ、経験的な事実によって、高い相関があれば、相互の影響は有意であるとする傾向にある。とくに、人類の集中している地球上の地域では、太陽活動が人類の生存に必要な生活環境の変動とつよく関連している傾向があるように考えられる。気候変動の長期的予測にあたっては、これまで、時間的にゆるやかに変動が伝わり、ある程度の時間の遅れを伴う変動を想定する例が多かったようであるが、理論的に、非線形現象の問題の解をもとめ、カオスの状態も可能性として否定できないとすれば、ごく短時間に急速な変動が発生してもふしぎではないと考えても無理はないものと思われる。

7. 太陽電波について

太陽面で発生するいろいろの現象は、地上から観測することができ、ミリメートル波(mm波)からデカメートル波(dm波)の波長20m(15MHz)までが、その対象となる。人工衛星によって観測可能な太陽電波は、波長約20mから約10km(30kHz)までの範囲のものが観測される。このように、太陽から放射される電波の種類は、太陽面現象によって異なっている。現象に対応して、電波の波長域、帯域幅、周波数変化なども異なっている。

1. 太陽電波—太陽電波で顕著な現象例は、次の表のような特徴がある。

太陽面現象	波長域	継続時間	大きさおよび位置	分類
電離大気	全波長域	年間不変	mm波~波長20m	静常太陽の輻射
コロナ凝縮	cm, dm波	数日	1" ~数分/彩層からコロナ下部	S成分
黒点(黒点磁場)	m波	数十秒~数時間	1~4" /黒点上層コロナ中	ノイズストーム
黒点(黒点磁場)	m波	秒	1~4" /黒点上層コロナ中	1型バースト
磁気衝撃波	m波	数分~10分	6~12" /コロナ中(10^3 km/s)	2型バースト
高速電子流	m波	数秒~数十秒	3~8" /コロナ中(10^5 km/s)	3型バースト
太陽面爆発	m, dm波	時~数時間	4~20' /コロナ中	4型バースト
太陽面爆発	cm波	数十秒~数分	<1~2' /コロナ中	マイクロ波バースト

2. X線バースト

軟X線(0.1~10keV)のエネルギー帯域では指数関数的スペクトルで、強度は $10^{-3} \sim 1 \text{ erg}/(\text{cm}^2 \text{ s})$ 、その継続時間は数分~数時間である。X線源の大きさは数秒~2' で、フレアるとき、下部コロナ中に形成される高温領域からの熱輻射($1 \sim 3 \times 10^7 \text{ K}$)である。

硬X線(10keV以上)のエネルギー帯域でべき関数的スペクトル、強度は $10^{-7} \sim 10^{-3} \text{ erg}/(\text{cm}^2 \text{ s})$ 、その継続時間は数十秒~数分、H α フレアおよび軟X線バーストの初相の強度増加がもっとも大きい時期に起きる。このX線源の大きさは<1' である。スペクトルは10~300keVであり、べき関数型が多いが、指数関数型もみられ、フレア部の変化が大きい。

3. ガンマ線バースト、太陽中性子、太陽荷電粒子線

ガンマ線バースト—フレアで加速された高エネルギー陽子や原子核が、太陽大気中で核と衝突して、各種の励起された原子核や中性子をつくる。

太陽中性子—フレア粒子のエネルギーがさらに大きくなると、主として、陽子とヘリウムの衝突により中性子(10^{30} 個)がつくられる。中性子の寿命(914秒)が短いので、光速に近い約100MeV以上の中性子が、太陽地球間で崩壊せずに、人工衛星と途上のモニターで検出されている。

太陽荷電粒子線—電子成分やイオンとして、3型や2型、4型、マイクロ波バーストの現象に対応して認められる。

8. 宇宙線について

宇宙線は、隕石と同様に、宇宙の物質が地球に飛来したものである。太陽系内や、その近傍からの隕石は、巨視的サイズである。さらに遠くから到達するものは、宇宙空間を光速に近い速度で移動することが必要であり、高エネルギー微小粒子においてのみ実現が可能なものである。すなわち、宇宙から地球へ降り注ぐ粒子としては、高エネルギーの素粒子や原子核が検出されている。このような粒子を宇宙線と呼んでいる。

1. 低エネルギーの宇宙線—太陽から放出される比較的エネルギーの低い(数百MeV)の成分は、太陽系内での伝播が太陽活動の11年周期変動の影響を受け、地磁気の影響を受けやすい。最高エネルギー($\sim 10^{20}$ eV)の宇宙線は、銀河系外から飛来したものと考えられている。この太陽活動の周期的な変動については、太陽を構成する元素の、太陽内部における運動に関連していることが、理論的にも認められている。太陽内部の原子個々の運動には、核融合および核分裂を伴った複雑な運動が含まれていると見られるが、電磁流体力学の理論的研究によって、太陽内部の原子が、電磁気的な性格を持ちながら、流体のような運動をしていて、しかも、その運動は、11年の周期的なものであることも理論的にあきらかになってきている。この電磁流体力学は、1950年代に、地磁気についてのダイナモ理論を導くときに地球内部の構成物質の流動の理論的研究に、はじめて、導入され応用された。なお、この11年周期は、地球上の気候変動にも強い関連がある。
2. 一次宇宙線—宇宙線の化学組成の約90% が陽子(水素の原子核)で、残りは、 α 粒子(ヘリウムの原子核)である。この組成は、宇宙の元素組成によく似ている。しかし、観測によれば、Li, Be, Bなどの軽い元素が比較的多い。これらの元素の成分は、重い原子核の宇宙線が伝播中に星間物質と衝突し破砕されて生じたと考えられている。地球の外からの宇宙線を一次宇宙線と呼んでいる。
3. 二次宇宙線—宇宙線は、地球大気に突入して、空気原子と衝突し、二次的に粒子を発生させる。数百GeV以上の宇宙線は、次々に粒子発生を繰り返し、多数の粒子群が地上に向かって飛来することになり、いわゆる、空気シャワー現象を起こすことになる。
4. 二次宇宙線の種類—宇宙線が、地球大気に突入することによって生じる二次宇宙線には、電子、陽電子、ガンマ線、パイ中間子、ミューオン、中性子、陽子などのほかに、ニュートリノがある。とくに、物質との相互作用の弱いミューオンやニュートリノは、地下深くまで貫通する。このような二次宇宙線は、地表で、 ~ 1 個/($\text{cm}^2 \text{min}$)の強度を持っている。二次宇宙線中の荷電粒子の約3/4をミューオンである。このような二次宇宙線を利用して、陽電子のほか、パイ中間子、ミューオンやストレンジネスを持つ素粒子の発見など、高エネルギー素粒子反応の研究に進展が認められた。とくに、二次宇宙線のうち、ニュートリノの確認が、カミオカンデを利用した観測によって実証されたことは、今後のニュートリノ物理学の発展への鍵となった。

9. 宇宙電波について

地球上における天体は、目視から光学的望遠鏡による天体観測(ガリレオ、1610)にと進歩し、それまでには判らなかつたことが発見される時代が変わつた。1950年代には、火星など太陽系惑星の光学的観測から、X線天文学、電波天文学の時代へと移行していくことになり、電波望遠鏡が利用されるようになる。現在(2007)では、地球から月や火星へ向かつてロケットを打ち上げ、周回軌道から月や火星の表面の状態などを観測したり、月面上の物質サンプルを採集して地球に持ち帰る時代である。また、太陽観測衛星(2006)によって、太陽黒点の詳細な画像情報が地球上の基地に伝送され、地球上で、その画像を見ることができた。

光学的望遠鏡による天体観測画像では、星雲などの詳細を捉えることができなかった。夜間の暗黒な天空の一部を探るために、1950年代には、小型の光電増倍管が利用されるようになった。この光電増倍管の製造技術の進展が、カミオカンデによるニュートリノ観測を可能にすることとなり、高エネルギーの一次宇宙線の大気中における影響としてのニュートリノの存在を実証することになる。

一方、1950年代頃から、電波天文学の分野が開けて、目視では不可能な宇宙空間の研究が推進されることになる。これまでにわかつていなかった宇宙のことを、科学技術の進歩発展のよつて調べることが可能になってきた。このことは、目視で分かっていたことを否定することになるわけではない。たとえば、目視では分からないが、電波望遠鏡を利用すると、さらに新しい情報が得られるようになる。たとえば、宇宙赤外線に関連したものとしては、

1. 電波で観測される天体—太陽の質量の5-8倍の大質量星が超新星爆発を起こした後に残る銀河系内の超新星の残骸や、太陽質量3-4倍の星が質量放出してできた惑星状星雲などが、電波望遠鏡で捉えられる。星間ガスの観測によれば、銀河の構造と回転の研究もできた。また、比較的高密度の星間ガス(主成分は水素分子)で、太陽質量の 10^{26} 倍の質量を持つ分子雲は、星の生成の場となるとされている。恒星からの電波も観測される。さらに、通常の銀河および銀河背景放射についての電波情報も得られる。クエーサー(銀河の中心核での爆発現象)や電波銀河の構造も電波望遠鏡で分かる。
2. 宇宙赤外線—代表的な赤外線源の種類としては、惑星、衛星、彗星およびその他の太陽系天体の熱放射(近似的には黒体放射)がある。恒星は赤外線源であるが、特に低温度の赤外巨星は近赤外線源である。濃い塵雲に囲まれた赤外線星では可視光が遮られている。
3. 原始雲—星の誕生は、濃い塵雲の中で起こる星間ガス雲の分裂や収縮による。生まれたての原始星は進化とともに特徴的な放射をする。
4. 惑星状星雲および銀河中心核—高温の電離した領域から成っていることが分かっている。
5. 系外銀河—銀河の赤外線放射は、星の成分および星間物質の成分および中心核の成分の合成で表される。
6. クエーサー—中心核の成分が、圧倒的に強く光っている。
7. 拡散光成分—以上の代表的赤外線源のほか、広がりをもつ赤外線放射として、惑星間塵の赤外放射、銀河面に集中した分布を持つ星間塵の遠赤外放射および一様な宇宙背景放射(近赤外—遠赤外)などがある。

10. 宇宙X線について

地球上における天体は、目視から光学的望遠鏡による天体観測(ガリレオ、1610)にと進歩し、それまでには判らなかつたことが発見される時代が変わった。1950年代には、火星など太陽系惑星の光学的観測から、X線天文学、電波天文学の時代へと移行していくことになり、電波望遠鏡が利用されるようになる。現在(2007)では、地球から月や火星などの太陽系惑星へ向かってロケットを打ち上げ、周回軌道から月や火星などの調査観測をし、物質サンプルを採集して地球に持ち帰る時代である。

一方、1950年代頃から、電波天文学の時代となり、目視では不可能な宇宙空間の研究が推進されることになる。たとえば、X線電波望遠鏡を利用して、さらに新しい情報が得られるようになる。たとえば、宇宙X線に関連したものとしては、つぎのようなものがある。

1. 銀河系内X線源—このX線源のひとつに、1)近接連星(X線星)がある。これには、たとえば、中性子星、ブラックホール、白色矮星のような高密度星と通常の星から成る連星で、星から高密度星にガスが降着することによって、重力エネルギーが解放され、X線を出す高温ガス(10^7 - 10^8 K)を形成する。その例として、X線パルサー、X線バースター、X線新星がある。X線新星は晩期型星とブラックホールや中性子星との連星系が多い。2)超新星の爆発後に形成される残骸(高温のガスや高エネルギー粒子)によりX線が放出される。3)ほとんどの恒星は高温(10^6 - 10^7 K)のコロナをもち、そこからX線を出している。
2. 銀河系外X線源—これには、つぎのような例がある。1)活動銀河は、クエーサーなどの銀河中心核をもつ銀河であって強いX線をだしている。2)銀河団の場合では、多くの銀河が力学的にかたまつた銀河団全体の広がった領域からX線が出ている。3)アンドロメダ星雲やマゼラン星雲など(近距離銀河)からは、近接連星や超新星からのX線が観測される。
3. X線の背景放射(ディフューズX線成分)—エネルギー0.1-2 keVのX線は、銀河系内の広がった高温領域(約 10^6 K)からの寄与が主なもので、方向により強度に差がある。
4. X線の発生機構—素過程として、1)高速の電子が原子核に接近しその電場によって加速度を受けるときに(電子は減速されて)制動放射として発生する。2)イオンに束縛された電子が高速電子の衝突によって励起され、低い準位に落ちるときに線スペクトルが発生する。3)高エネルギー電子が、磁場によって制動をうけることによるシンクロトロン放射においてもX線発生がある。4)高エネルギー電子が、光子(光量子)と衝突してX線のエネルギーまではじきあげる“逆コンプトン効果”などがある。
5. 黒体放射—電子が熱平衡分布をしているときに放射される場合を“熱放射”とよぶ。その場合には、上記4.のうち、1)と2)とが基本となる。これは、連続スペクトルと線スペクトルから成り、両者の出力は、主に、ガスの温度のよって決まる。密度が十分に高くなると“黒体放射”となる。

ここでは、天文学における情報をもとにして、宇宙からのX線の発生源について述べた。

1.1. 天体および宇宙空間の観測について

地球上における天体のうち、とくに、太陽は、人類の歴史時代以前から、観測の対象であり、朝から夜までの昼間の位置や高度の情報が生活上重要であった。夜間には、天空に目視追跡できる主な恒星および惑星が、季節および時刻の情報のために重要視された。光学的望遠鏡による天体観測(ガリレオ、1610)によって、惑星の運動や恒星の分類などの情報量が飛躍的に増加した。衛星としての月の情報も重要であった。1950年代には、火星など太陽系惑星の光学的観測から、X線天文学、電波天文学の時代へと移行していくことになり、電波望遠鏡(観測周波数3.30MHz~345GHz)による観測が進んだ。さらに、開口合成望遠鏡(観測周波数1.6~115GHz、分解能 $3''\sim 1.2''$)観測が可能となり、多数のアンテナを組み合わせで分解能を上げることが可能となった。太陽観測には、多素子干渉計(観測周波数0.17~115GHz)を用いることができる。

地上に据付けた光学赤外用の望遠鏡(最大口径10m)では、夜間の天体観測ができるが、地球表面の大気層による屈折や減光についての補正のほか、観測点の地理緯度と地心緯度との差についても考慮する必要がある。このような地表大気の影響の少ない高所を観測点に選ぶことも試みられているが、現在(2007)では、地球大気外の人工衛星に設置された光学大望遠鏡を用いて地上の光学望遠鏡では不可能な観測を可能なものになっている。

地上の光学的観測では、大気層に関する補正を考慮したとしても、現象として、夜天光と称される夜空からの光がある。すなわち、1)大気光—地球上層大気(分子、原子)の発する光、このうち、主な大気光輻射としては、強度1500R (rayleigh単位= 10^6 photon/cm²(column)s)が、中緯度天頂における平均値とされている。気象学者の一部は、このphoton単位の現象を拡大解釈して大気海洋の現象は量子力学の時代であるとしているようであるが、定量的な考慮が必要であろう。このphoton(光子)は、1950年代には、当初、光子と称されていたもので、量子力学に関連していることに間違いはないが、気象現象のひとつの事象の対象になっていることに留意する必要がある。気象学関連の分野では、この光子が地表大気層の現象の要因としているが、このような場合には、対象とする現象における定量的な検討が必要である。2)黄道光—太陽系内の微塵が太陽光を散乱した光、天文学的に輝度(単位-S(vis)=1平方度あたりの10等星(実視等級)の数で表した輝度)によって表記されている。黄道光の輝度および偏光度は、太陽からの離角によって異なっていて、黄道上、波長5300Å (5.30μm)の例が、国立天文台編の理科年表に掲載されている。3)星野光—星や星雲の集積光などである。黄道光の例と同じ輝度単位によって表記されている。

現在では、地球から月へ向かってロケットを打ち上げ、あるいは、月探査衛星によって、月の周りを周回して月面の状態などを観測したり、月面上の物質サンプルを採集して地球に持ち帰ることも可能な時代となっている。また、2006年には、太陽観測衛星によって、太陽黒点の詳細な画像が、地球上の基地に送信され、地球上で、その画像を見ることができるようになった。

第2部 惑星地球からみたブラックホール

1. 緒言

人類は惑星地球上で生存して、人類の歴史をたどることができる。それも、歴史時代についてのことは分かっても、人類の発祥については不明な点が多い。さらに、惑星地球の歴史は約45億年と言われているが、その詳細も、地質年代学などの関連分野において研究調査が進められている現状である。加えて、惑星地球をふくむ宇宙については、その誕生は約145億年であるとされているが、その詳細は、宇宙が広大なために、いろいろの知識と技術を活用して、その一端を捉えようとしている段階であると言ってもよいであろう。米国が打上げた電波観測衛星によれば、宇宙の年齢は137億年であるということである。宇宙の始まりは、ビッグバンと呼ばれる大爆発で始まった。この宇宙誕生から8億年後に、最初の星が生まれ、それが集まって原始的な銀河が形成されることとなった。宇宙が高温ガス塊であったころ放射された電波の“ゆらぎ”の波形から、ビッグバンの規模や密度を求める。国立天文台による2006年9月の発表によれば、宇宙空間のあらゆる方向から波長1mm前後の電波が地球上に降り注いでいるという。これは、ビッグバンの余熱であり、2.73Kであることが分かった。絶対温度と比較して270.42Kの差がある。これから宇宙誕生してから星が生まれるまで8億年であることが求められるのである。この段階で、科学的な情報も豊かになってきたが、それでも、まだ、未知の部分が多い。地球の大気圏外の天体望遠鏡による観測も可能な時代となって、地球上にあって、人類は、宇宙について新しい知見が得られる時代になった。

惑星としての地球と宇宙との間には、地球の規模とは異なった現象が多く、たとえ地球から遠くにある星も、人類の生活とは無関係ではなかった。さらに、人間の目に見えない電波によって捉えられるような星のほかに、星雲や銀河が多数あることも分かってきた。それでは、人類の起源をたどるには、宇宙の起源に関連したことも調べる必要がある。日本の赤外線宇宙観測衛星は2006年打ち上げられ、観測を開始し、新しい宇宙のマップを発表している。ここでは、最近の情報(たとえば、Miller and Reynolds, 2007)などをもとにして、宇宙の歴史にかかわりのあるブラックホールとその周辺について、その概要を紹介する。これまでの知識だけでなく、新しい知識も加えて、宇宙の始まりについて理解するために、この本文の記述が、少しでも参考となれば良いと考えている。

2. ブラックホールとは何か

宇宙は広大であるが、その局所的な時空構造には、ブラックホールの影響が強いと考えられている。しかし、ブラックホールは、ひとつだけではなくて、いくつも存在する。そして、それらのブラックホール群が銀河系の形成に深くかかわっている。銀河系の構成要素である塵のようなもののスケールがどの程度であるかということも、ブラックホールの影響を受けているとみられている。

地球が、太陽系のなかの惑星の一つであり、太陽系が、ひとつの銀河系に属している。それに、よく似た銀河系が、ほかにも、たくさん存在する。その多くの銀河系のもととなるのがブラックホールであるといってもよいであろう。

それでは、ブラックホールとは、一体、何であろうか。

最近の天文学(あるいは、宇宙物理学)の分野では、とくに、ブラックホールの問題に注目されている。このブラックホールでは、物質のもっているエネルギーを極めて効率的に取り込んでいる。少なくとも、静止した物質の30%は取り込むことができるようである。なぜかという、ブラックホールは、宇宙のなかで、もっとも重要な運動にかかわっているとみなされてきたからである。それに比較すると、活発な銀河系の核も、電磁波を放射している銀河系も、あるいは、ガンマ線バーストも、運動のスケールは小さい。たとえば、エネルギーを取り込んでいるブラックホール“AGN”に注目してみよう。この質量が、太陽の質量の何万倍あるいは何億倍であり、その位置が、AGNを取り囲んでいる銀河の中心であるとき、その銀河系で、AGNは、 10^{40}W の力を得ることになって、そのAGNを、その外側から見ると、数千倍の輝きとして認められることになる。このような銀河AGNの集団(銀河集団)などでは、基礎物理学におけるローレンツ不変量や一般相対論などの検証に適切な実験を自然な条件のもとで実施することが可能となる。驚いたことには、最近わかったことではあるが、ブラックホールは巨大なスケールの宇宙構造の形成を支配して重要な役割を果たしているものと考えられることである。実際の観測と標準的理論とに一致しないところがある。それは、換言すれば、銀河系形成の重要な要因として、ブラックホールによるエネルギー注入が認められるらしいということなのである。

3.時空とスピン

太陽系においての一般相対論の検証は、きわめて高い水準の成果をもたらしたが、強い力の場という限定された場における実験検証ではあるけれども、その目的達成に必要ないくつかの条件を考えると、最適と言ってよい条件がみだされていることが判明した。すなわち、ブラックホールを周回している円盤状のガスから放出されるX線が、上述の実験検証を容易なものとしたという事実である。詳しく言えば、銀河系1型AGN群の70%の調査によって、円盤内部の様子が明瞭になり、その内部構造を示すスペクトルの中に相対論から導びかれるいくつかのスペクトルが認められたということである。このことによって、自然というものは何と親切なことだろうと感じられたものである(Nandra et al., 2006; Reeves et al., 2006)。

事実、そのようなスペクトル線は、超巨大質量物質や星間質量物質のブラックホールの例でもみとめられている。とくに、このうち、星間物質の例は巨大な質量の星の群の死滅によるものである。スペクトルをみると、多くのスペクトル線からのものでエネルギー放出が認められ、その線には円盤を構成している物質の軌道運動による特殊相対論的なドップラー効果が現

れているし、また、相対論的な重力の赤色偏倚の影響もみとめられる。このように、多くのブラックホール群周辺の内部真相の相対論的領域を調べることが可能であるし、また、これによって、じょうじゅつの効果や影響がブラックホールの質量が百万倍あるいはそれ以上となることとよく似ている。

ちなみに、相対論的な円盤に認められる線のひとつの例として、X線源MCG-6-30-15についてみると、このX線スペクトル群は現在活発な銀河の核にあるのがわかっている。これは、宇宙天体望遠鏡”すざく”および”XMM-Newton”によって得られた観測データをみれば分かることである。ブラックホールの周りの周回軌道における粒子群の速さは、光速に近く、特殊相対論的な放射にはドップラー効果が伴われており非対称な放射線スペクトルとして捉えられる。観測されるX線のなかには、遷移帯の静止状態でのエネルギーが、6.4 keV以下の例もある。このような線群を利用すれば、一般相対論の予言を検証に好都合であると考えられる。この線の表示を明瞭なものとするためには、たとえば、連続スペクトルを基準としてフラックスの比を検討するのがよい(Fabian, 2003)。

また、チャンドラX線天体望遠鏡によって、銀河M82の中心付近の画像が得られている。この画像には、ガスおよび星間物質の力学によって求められた銀河の中心の表示がある。画像をみると、捉えられたX線源の放射強度が明かに変動していることがわかる。銀河の中心から離れた位置にあるX線源、X線輝度のピーク、X線強度の変動などは、中規模の質量をもったブラックホールである。このような画像の例は、およそ立体角30秒の範囲である。この中規模の質量をもったブラックホールは銀河M82の中心から少なくとも600光年の距離にある。

放射線の観測を利用することによって、円盤にあるガスの流れが簡単に分かる。天文学物理学の専門家の考えるところによれば、X線の観測結果から見る限り、銀河系の円盤の幾何学的な形状は薄い円盤であり、パンケーキのような形状であるとみなされている。つまり、円盤のなかのガスの流れの速度勾配は小さいために、ブラックホールの重力ポテンシャルによって、ガスの流れは、ケプラーの軌道のように、円形に近いと考えられる。暑さの薄い円盤の形状についての理論の展開には無理がなく、ブラックホールと同様に、白色矮星や若い新星の周辺をとりかこんでいる円盤にも応用の道が開かれている。しかしながら、ブラックホール周辺の内側深部の相対論的な領域の探査の目的のためには、このような円盤の物理の細部までは必要としてはいない。それというのも、ブラックホールそのものの効果が一番顕著な効果だからということである。

ブラックホールは、基本的に、角運動量をもっているか、あるいは、スピンがあるかでなくてはならない。実際、円盤の高い角運動量をもった物質が蓄積することによって、ブラックホール群はスピナップし、また、天文学的にみて、ブラックホールの大部分は高いスピンをもっているとみられている。このスピンの効果は、銀河の内側深部の安定な円形軌道半径(ISCO)の縮小のもとになり、その半径より内部の円形軌道は不安定とする働きがある。

個々のブラックホールのスピンは、パラメーターの導入によって、特徴を表すことができる。

すなわち、 $a \equiv cJ/GM^2$ 、ここに、 c は光速、 J はブラックホールの角運動量、 G はニュートンの定数、 M はブラックホールの質量である。なお、シュワルツシルドのブラックホールでは、ISCOの値は $6 GM/c^2$ であり、スピンのない。これと対照的に、 $a=1$ であるようなブラックホールでは、スピンの値は可能な最大値をとり、 GM/c^2 に近い値である。これは、シュワルツシルドの例よりも小さい値である。いま、 M の値がわかっているときには、ISCOの値が最大のときの重力の赤色偏倚は、二つのケプラーの軌道における質量に対するドップラー偏倚の差として説明できる。

銀河の円盤のスペクトル線の研究の道は、1993年の日米共同の宇宙観測衛星打上によって開かれたが、その一方で、NASAのチャンドラX線観測所およびヨーロッパ宇宙観測機関ESAのXMM-ニュートンによって超巨大な星間物質のブラックホールからの相対論的な円盤のスペクトル線が鮮明に捉えられている。さらに、最近の例としては、新しい日米観測計画によって、宇宙観測衛星”すざく”が重要な働きをしている。

ちなみに、コンステレーション-Xと呼ばれるミッションおよびNASAのゴダード宇宙センターによれば、NASAの宇宙観測衛星の計画では、チャンドラーX線観測所の主目的は、ブラックホールのスペクトル観測とブラックホールの宇宙における時間的変化の追跡に置かれていて、その目的のために、長さ約10m、直径4.5mのユニットに、4台のX線宇宙望遠鏡が備え付けられている。

観測機器の進歩に伴う観測成果は、円盤のスペクトル線についての理論的モデルとよく一致している。これまでのスペクトル線のモデルでは、スピンをゼロとするか、最大とするか仮定していたが、あたらしいモデルでは、観測データからスピンの値を計算できる。たとえば、銀河MCG-6-30-15のなかの(よく知られているAGNの近くに位置する)超巨大質量のブラックホールのスピンの値が $a=0.989^{+0.009}_{-0.002}$ であり、この値が観測から得られた信頼性の高いものとして、はじめて求められたものである(Brenneman and Reynolds, 2006)。われわれの属する銀河のうちで、星間物質のブラックホールのなかにあるような例では、たとえば、GX339-4やXTEJ1650-500のようにバイナリー系であり、スピンは高いものと判断される。

物体の集まりの重力ポテンシャルエネルギーが変換されて電磁波放射として観測される過程の詳細については、複雑であり、まだ十分に分かっているわけではない。放射の大部分は、円盤の表面から、あるいは、もっと性格に言えば、光球から、黒体放射として放出されるわけである。この放射は長巨大質量のブラックホールからのUV(紫外線)周波数帯にある広い帯域周波数帯のスペクトルのピークとして、あるいは、星間物質のブラックホールからの軟いX線周波数帯のスペクトルのピークとして認められる。ただし、いずれの場合にも、主要なパワーはパワースペクトルのなかの硬いX線成分として放射される。この成分は、エネルギー豊かなコロナに認められる。それは、円盤をはさむサンドイッチのようであり、あるいは、エネルギーを持ったジェットでは基準放射線として認められる。このような場合、放射線の如何にかかわらず、円盤の光球の放射というのは硬いX線によって生じたものであり、この硬いX線によって蛍光X線放射の線スペクトルが認められることになる。このX線が強い重力

領域の検知のために利用されるわけである。

円盤からのX線を利用する研究は、現在では、ふたつの最先端の研究課題につながっている。すなわち、そのひとつは、ある種の放射源に認められる強い重力場の効果、また、別のひとつは、超巨大質量のブラックホールが多数存在する場合におけるブラックホールのスピンの測定の問題である。強い重力場の研究が推進されると、重力の影響による光の屈曲やスピン関連の効果がわかることになる。また、この場合、スピン関連の効果は、磁場を通してのブラックホールからの回転エネルギーの消滅として認められる(Rccvcs, 2006; Wilms et al., 2001; Minutti and Fabian, 2004)。このような研究の進展によって、きっと、宇宙空間の時間スケールから見たブラックホールのスピンの時間的な発展過程が明らかにされることになるであろう。

上述のようなことから、いろいろの観測に希望を持つことができる。Alina Streblyanskaを中心とした研究グループは、超巨大質量のブラックホールからの赤色偏倚した光をXMMM-ニュートンを使って観測し、そして、平均的なスペクトルに認められる相対論的放射線スペクトルを発見している(Streblyanska et al., 2005)。さらに大きな望遠鏡を利用すれば、赤色偏倚に関っているスピンの、ほとんどのブラックホールで必要としている質量による偏倚としてもよいことがはっきりする。このことが、スピンの駆動源としての宇宙塵のあつまりぐあいやブラックホールの合体の作用としてのスピンの減勢の特徴を表現するモデルで、どのようなものが適切であるかを示すことを可能にするものと見られる。

4. 中規模質量のブラックホール

ブラックホールの最大の特徴は、これまで考えられてきた自然観とは異質であるということであろう。つまり、ケプラーの第3法則は当てはまらないということである。星間物質のブラックホールは、単一の巨大質量の星の終着点である。このようなブラックホールは、バイナリー系として発見されている。そこでは星の質量は、連結星から移行していて、そこで、物質は団塊となり、X線のフレア(閃光)が現れる。光学的なスペクトルの特徴から判断して、バイナリー系の中心からの径距離とそこでの接線速度の関係は、ブラックホールの質量によって決まる限界があるようである。第一に、主星の低質量の限界についてもれば、これは、バイナリーのつくっている団塊の構成によって決まる限界であり、中性子星の上限を超えている。この場合の限界を定めるものとしては、光速度 c を超えないような内部音速であるという条件をみたすとき、主星はブラックホールとみなされることになる。同様にして、超巨大質量なブラックホールには銀河の中心が集まった状態であり、それは、Sagittarius A*の周辺の単一星の楕円軌道に関連しているものである。この、Sagittarius A*のブラックホールの質量は、銀河の中心において、 3×10^6 乃至 $4 \times 10^6 M_{\odot}$ 程度であるとみられているようである(たとえば、Miller and Reynolds, 2007)。

現在の天文学の知見によるところでは、質量が 10^2 - $10^4 M_{\odot}$ のようなブラックホールの例あることは明らかにされていない。ところで、このような中規模ブラックホールの発見と研究の

経過から、銀河の時間的・形成過程や星間クラスターについてあらかた明らかになるものと考えられる。宇宙の極く初期の段階では、非常に巨大な質量をもっているが金属成分の極めて少ない星が、中規模質量のブラックホールに残されていたに違いない。理論的考察によって推測されることとして、中規模質量のブラックホールの数がおよそ100程度のものが現在の宇宙にある銀河として存在していたものとみられている (Madau and Rees, 2001)。推測によれば、多数ある中規模質量のブラックホールの一部はひとつになって、超巨大質量のブラックホールの種を形成され、現在みとめられるようないくつかの銀河の中心ができる。また、別の可能な形成機構としては、中規模ブラックホールは、高密度の星のクラスターが集合体となったものであるという見方もある (Miller and Hamilton, 2002; Portegies Zwart, S.F. et al., 2004)。

以上のような考え方もあるが、中規模質量のブラックホールの特徴として、その周辺に認められる状態もすべて考慮されている記述が、最終的なものとして要求される k となる。超寿命の天文学的システムの輝度についての“Eddingtonの限界”の上限について必要とされる条件は、放射による圧力は重力による圧力以上であってはならないということである。水素から成る団塊によって構成されている質量 M のブラックホールに着目するとき、その輝度 L_{Edd} の値は、およそ $1.3 \times 10^{31} (M/M_{\odot}) W$ である。このようにして、ブラックホールに団塊を形成している質量に対する下限として、観測によって得られた輝度を利用することが可能となるわけである。

渦巻き状の銀河の周辺について、チャンドラおよびXMM-Newtonによって明らかになったことは、銀河の中心から隔たったところにあるひとつ階級のX線源の例では、みかけのX線輝度 L_x の値は、少なくとも $10^{33} W$ であるということである。さらに、そのような場合の、X線源のスペクトルは、さらに変形して、推定上の団塊円盤がブラックホールに関与していることが明らかとなってきた。この場合の、団塊円盤はEddingtonの限界に近い輝度を持った我々の銀河の星間物質ブラックホールよりもはるかに低温であるはずである。団塊円盤の温度スケールはブラックホールの質量と逆の増大関係にあり、たとえば、 $T \propto M^{-1/4}$ と書ける。それは、放射円盤領域の増大が輝度の増大よりも大きいことによるのである。したがって、ここでの低温のスペクトルというのは、中規模質量のブラックホールの存在を示唆していることになるわけである。これを、また、別の面からみれば、ある大きい輝度の発生源の一部の“ある”ところに認められるX線の強度の変動を調べることによって、星間物質ブラックホールより長い時間スケールがあるという特性が存在することが見出されることになる。このことは、すなわち、中規模質量ブラックホールの例でも同様なことが認められると言えることが明らかになることにつながっている。

ところで、上述のスペクトルの変形を語ることは容易なことではない。それでも、これに代わるものとして、別のスペクトルによる記述をしようとすることは困難なことであり、かつ、全く意味が無いことになるから避けなければならない。それに、輝度から分かることであっても、放射性同位元素による放射を想定するときには、相対論的電磁波ビームあるいは力学的に放射を集中させたらよいわけであるが、これによって考えるかぎり、異常に高い輝度を

想定することになってしまう。現在、銀河M82 X-1の1例だけが、 L_x の値が約 $10^{34}W$ であり、中規模ブラックホールであるとみなしてよい対象と考えられている。

光学的放射速度は、強いX線輝度の波源に対するもので、近い将来、分かるようになるであろうと考えられるが、これも、ある確率で考えるとして言えることであって、きわめて稀なことと見なければならないであろう。これに対応した決定論的な光学的な事例は、これまでのところ、知られていない。とくに、その中心で団塊形成が進行している段階においては、放射速度について調べることは、きわめて困難である。観測方法が改善されて、X線観測で焦点がびたりと合うようになったときには、銀が周辺の認められるような、どのような輝度をもった波源であっても、中規模質量のブラックホールであるということになる。

5. ブラックホール円盤

多くの銀河それぞれの超巨大ブラックホール周辺での星の団塊は、イオン化に伴う電磁波の主要な放射源である。このような超巨大ブラックホールへ集積するような状態の反復期の放射の圧力や物質の流出が、多くの銀河系での星の誕生に関係があると考えられ、また、古い銀河では星の形成が顕著ではなくなっていることもとも関係があるようである(Di Matteo et al., 2005)。宇宙に認められる多くのブラックホールも銀河も、時間とともに成長発展をしている。円盤での団塊形成過程が分かれば、それに関連して、かかわりのある宇宙のイオン化に伴って質量や流れがどのようなものであるかも分かることになる。

団塊じょうの円盤は、微妙なものであり、また、興味深いトリックである。円盤内における天文物理学的なプラズマは極度に粘性が小さくて、そのために、そこでの角運動量の流れや団塊形成が実際にどのようなになっているのかは分からないのである。天文物理学者のみとところによれば、角運動量の輸送を考えるに当たって、問題の中心に磁場があると考えなくては理解ができないということのようである。この問題では、一般的に考えて、二つの物理的な機構が関わっている。たとえば、Nikolai Shakura and Rashid Sunyaev の簡単な試みによれば、団塊の進行は流体の乱れによって生じる大きい粘性によるものである(Shakura and Sunyaev, 1973)。また、Steven Balbus and John Hawley が検証したところによれば、強い電磁流体力学的な不安定が乱れを発生させているのだということのようである(Balbus, 1991)。内部の粘性に関連した黒体放射のスペクトルの特性は円盤という天文学的な条件設定のもとで、観測によって捉えられたものである。この場合の円盤というのは若い星間物質からブラックホールまで、いろいろである。しかしながら、このようなスペクトルの出現は、乱れのようなあまりはっきりしない現象と関連があるとは考えにくい。このようなスペクトルが磁場の影響によるなどとするのは、少なからず無理があるのではないだろうか。核運動量は、円盤から失われていくが、これは、周辺の磁力線に沿って認められる流れによるものである(Blandford, 1982)。

宇宙観測装置、チャンドラやXMM-Newtonによる新しい観測ができるようになって、科学者

も、やっと、ブラックホールの物理的機構を詳細にわたって研究することができるような時代をむかえた。吸収スペクトルを、高分解能の装置で観測すると、円盤周辺の電離状態にある流体の流れが分かる。その速度は、100-1000 km/s というものである。場合によっては、風速は、その何倍もの値となることがあっても不思議ではない。もしも、この風が、ブラックホールのごく周辺に限って認められるということであれば、その限られた範囲での条件のもとにおいて、質量の流出と流入との比率を求めることが可能な場合があってもよい。ここで、観測によって、磁場というものが、円盤で認められる団塊の運動構成に対する決定的な鍵となることが分かる。この場合、円盤周辺での団塊の問題が、電磁流体力学的に見て、関連する現象が乱れであっても、風であっても、あるいは、乱れと風との両者であっても、問題の本質が変わるところはない。ひとつの星間物質のブラックホールを問題としてとりあげた例がMiller et al.(2006)の研究例であり、また、ひとつの超巨大質量のブラックホールを問題として研究した例がKraemer et al.(2005)の研究例である。

すでに述べたことではあるが、薄い円盤状の団塊におけるガスの運動は円形鼓動を描いて周回している。それは、ケプラーの法則にしたがった運動として近似できる。また、超巨大質量のブラックホールについてのX線観測を、観測装置XMM-Newtonを用いて実施した場合に得られた結果では、円盤の内側の軌道と対応した周期性の運動が考えられる。さらに短時間の時間スケールの例で、星間物質のブラックホールの例では、研究結果が、実際の観測によく合致している。宇宙観測のために、1995年以来、NASA(米国宇宙研究機関)では観測装置として、Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE)を利用して、とくに、宇宙のX線観測を実施している。これによって、短時間の現象が分かり、過渡的な変化を時々刻々とたどることが可能である。いろいろの観測成果のなかで、すばらしい観測の一例として、星間物質のブラックホール内で発見されたミリ秒単位での変動である。この変動もケプラーの法則に対応した運動としてみてもよいような運動である。この軌道についてみても、ケプラーの法則から求められた軌道の時間スケールによく対応している。一般相対論的な効果というものが、このような振動性の現象に関わることが考えられるし、あるいは、重要な役割を果たしていると言ってもよいであろう。このような例の存在を求めて、それらの位置と出現頻度を確かめるために、観測装置Constellation-Xに搭載されたスペクトロメーターの計画が進行中である。スペクトロメーターの分解能および感度が高度の技術によって改善されることによって、今後、計画の進展はさらに顕著なものとなることであろう。

6. 宇宙観測装置 Constellation-Xについて

米国における宇宙観測装置Constellation-Xの打上げは、現在機能しているNASAのChandra X線観測装置の次世代装置として、今後、¹⁰15年以内に打ち上げられる計画になっている。このConstellation-Xの計画は、新しい世紀における10ヵ年計画として位置付けられていて、その使用については、多数の宇宙観測計画に関連したミッションのなかから、とくに、James Webb Space Telescopeがその使用の第一位の優先権を獲得している。一方、Constellation-Xは広い帯域にわたる広範囲な科学的観測研究に利用できるが、その本来の目的はブラックホ

ールのごく周辺の自然を調べることであり、そこでの物質の命運を確認することであり、さらに、多数のブラックホールと多数の銀河系との連動した時間的空間的な変動を捉えることである。このConstellation-Xの持っている機能としては、銀河のクラスターを利用して、自然界の暗黒エネルギーの特性を調べることであって、その精度は超新星の研究にも劣らない水準にある。このようなことを考えあわせると、地上における暗黒エネルギーの観測と相補的な関係にあるといってもよいであろう。

ハワイ島の山頂に口径10mのKcck望遠鏡が据付けられた時点では、まだ、初期の1mあるいは2mの口径の光学的望遠鏡あるいは赤外線望遠鏡によってえられた情報と技術の発展に寄与した思想が、まだ、尾を引いていた。同様なことは、高分解能のスペクトロスコープであるConstellation-Xについても言えることである。現在は、ChandraおよびXMM-Newtonといった装置を用いて、ブラックホールからの光を捉えているが、Constellation-Xが利用できるようになると、これまでの数百倍の光を、単位時間あたり、捉えることができるようになる。この効果的な集光技術の詳細は、kの計画に参加している三つの研究機関によって実現されることになるであろうが、とくに、Constellation-XのX線観測計画およびNASAのGoddardにある航宙研究センターに負うところが大きいことには間違いはない。

さて、上述のような情勢のなかにあっても、現存の光学的観測装置やX線観測装置も重要であり、かつ、興味深い側面がある。たとえば、双曲線型の軸対称なパラボラ反射鏡は、入射平行光線の反射の効率が優れていて、立派な光学的画像をもとめることが可能である。これに対して、X線を利用した場合には、うまく焦点を結ぶことができないという難点がある。それは、X線が吸収されやすく、入射角によっても調整が容易ではないことが原因である。そのかわり、X線を利用すると、少しの角度の偏りがあっても焦点を調整することは可能であるという長所がある。したがって、X線を利用する際には、小さな角度の偏りを対象とし、X線の反射鏡は、円錐状とし、入射光の経路の変化を1度よりも小さなものになっているのである。実際の場合、この二つの特徴を活用するのであって、第一段階として、パラボロイド(長軸回転双曲面)の反射鏡が必要であり、第二に、ハイパーボロイド(短軸回転楕円面)の反射鏡が必要となるからである。ここで、X線に対する反射鏡は、円錐状であるから、同軸反射鏡を重ねた(nesting)構造にして、集光効率を上げるように工夫してある。ちなみに、ここで、Chandraの例をみると、4個の反射鏡でひとつの望遠鏡ができあがっているという構造である。また、Constellation-Xの例では、4個の独立した望遠鏡を組み込んだものをひとつの望遠鏡として作動するような工夫がされている。

最近の光学的望遠鏡では、CCDに光を集める方式をとっている。これは、市販のデジタルカメラの電子回路の機構によく似ている。一方、スペクトロスコープ型の望遠鏡は、装置としては、別のタイプとして取り扱うことが通例である。しかし、X線は、光学的にみて、光量子のよりも高エネルギーであるので、画像スペクトロスコープの機構とをつなぎ合わせる事が可能である。ここで大切なことは、光学的にみた光量子は、CCDでほんの少しだけ電子を放出するだけであるが、X線の光量子は単一であってもCCDで十分なエネルギーを持っている。ここで、CCDのかわりに、Constellation-Xでは、X線分光計をスペクトロスコピーの

として、最大のスケールを考えたとして、ジェットは銀河のクラスターの時間的变化に影響を及ぼす。したがって、この場合のジェットは、宇宙の最大の限界の問題に関連したものといつてよい。

光学的な光を対象とするとクラスターは、数百あるいは数千の銀河の集まりという形をとることになる。この場合には、個々の銀河から到達した光学的な光によって、バリオン的な質量が表現されることになるが、それは、直ちに、バリオン的な質量の大きさを示すものとは限らない。このバリオン的な質量は、銀河間に希薄なガスの状態で存在し、重力ポテンシャルによりX線温度(kelvinの数千万倍)にまで加熱され高温となる。そして、バリオン的な質量は全体として、暗黒物質の存在による重要性は、それほどものではないことになってしまうと考えられる。

ここまでくると、銀河のクラスターのバリオン成分についての理解をえようとすれば、X線観測が必要であり、重要になってくる。この場合のX線画像においては、クラスターというものは、個々の点の集合体ではなくて、表面輝度の高い、広がりをもった拡大成長を継続している物体として認めなくてはならない。銀河のクラスターのなかのあるものには、銀河の中心部に位置する超巨大質量ブラックホールの痕跡として高温のガスを保存しているものがある。典型的な例としては、ペルセウスのクラスターの例がある。この画像の例は、ほかの例と同様に、Chandraによって発見されたもので、高温のX線ガスとして認められ、クラスターの中で認められる渦状の現象であり、これは、長巨大質量ブラックホールへの集積過程で引き起こされるジェットの周期的な活動に対応しているとみなされている。このほかのクラスターをChandraによって観測した例では、X線ガスの中に空洞がみとめられるが、これは、中波帯の強力なジェットによって形成されるときに形状に対応していると言ってよい(Forman et al., 2005)。

ブラックホールのジェットは、クラスターのガスに仕事をしているということである。理論的な計算によれば、音波とジェットとに着目するとき、クラスターの中心に向かっている低温のガスの流れにさからった音波とジェットが認められるということは、そのような現象が現れるのに十分なエネルギーの供給が存在しているということをあらわしているということになる。そのかわり、星の形成は抑制されることになり、また、銀河の時間的发展過程に若干の相違が現れることになるわけである。

8. おわりに

このようにみてくると、高エネルギーの天文学に進展というものが認められたのは、X線観測が可能になったことによるところが大きいということになる。たとえば、ブラックホールのX線観測によって、強い重力の場についての検討の確実な手段が見つかったことである。しかしながら、このような一連の観測計画によって得られた発見は、単に、重力についての検討にとどまったわけではなかったのである。これに加えて、さらに、ブラックホールは、

目的で導入することになるだろう。このような画像解析装置を使うことによって、目的とするエネルギーの分解能は、イオンのK-線周波数帯では、およそ2800分の1となる。一方で、X線のCCDにおける分解能は約50分の1である。

このようにみえてくると、広範囲のデータ収集が可能であり、最新のスペクトロメーターを搭載しているという点で、Constellation-Xによって、大いなる進歩発展が可能になるものと考えられる。初期の段階では、超巨大質量のブラックホールを観察して相対論的円盤に関連したスペクトル線の研究が可能となるであろう。この場合、時間スケールは、軌道周期よりも小さいものが対象となる。また、ブラックホール近傍の時空構造について定量的なデータが得られることになる。さらに、10個以上の長巨大質量のブラックホールの例においても、一般相対論の検証にあたって強力な新計測器の利用が可能となる。その上に、Constellation-Xでは、300個以上の長巨大質量のブラックホールについてスピン計測ができるようになり、これに伴って、赤色偏倚の数値が2以上の場合にも対応できるようになるであろう。

現在までに観測できている宇宙で、中規模質量のブラックホールが存在するかどうかという問題は、Constellation-Xを利用することによって明らかになることであろう。このようにして、中心から遠くに位置している銀河の近傍のブラックホールの研究も容易にできるようになる。それは、現在、太陽系の属する銀河のなかに存在している星間物質のブラックホールを観測研究することと同様に、簡単なことになる時がくることを約束するものである。

加えて、Constellation-Xの導入によって、これまで以上の大きなスケールでのブラックホールの周辺環境へのインパクトについての理解が深まるに違いない。宇宙観測では最も基本的な問題において重要なことではあるが、計測装置の感度もよくなり、スペクトルの分解能もあがって、銀河のクラスター内に認められる高温のガスと長巨大質量のブラックホールとの相互作用について、これ間で以上に理解が深まることになればよいと考えられる。また、関心のあるクラスターのガスについて温度構造が判明することとなり、あわせて、ガスの組成の詳細な構成が決定できるということになることが十部に予想される。そこまでの段階に到達すれば、ジェットによって放出されるエネルギーのなぞも解けて、クラスターの中心核とジェットのエネルギーの問題も解明されることになるであろう。

7. ジェットの問題

円盤に風が存在するからといって、ブラックホールが単に物質の吸込み口になっているというだけではない。実際に、ブラックホールの働きとして、宇宙における加速装置の役割を果たしており、物質の放出ジェットは長相対論的な速度である。ところで、研究者のみとところでは、そのようなジェットは、電波の周波数によっては、問題があることが最近の議論の焦点となっている。それは、ブラックホールは如何にしてジェットを駆動しているかという問題である。円塊状のエネルギーのうちのどれだけが、運動エネルギーとしてジェットとなり、どれだけが中波帯の電波として放射されているかという問題である。また、そのジェッ

トが、ブラックホールの周辺環境にどのようなインパクトを及ぼすかということも問題である。この問題の取り組みするためには、X線および中波帯の電波の観測との両者を突き合わせてみなくてはならないという傾向が強くなってきている。そこで、この問題に対する答というものの内容についてみることにすれば、それは驚くべきものであるということが分かるに至るであろう。たとえば、時間的に平均としてみれば、ブラックホールでは、団塊上のエネルギーが中波帯電波とジェットとの分配される割合は一定であるとみられることである。もちろん、時として、相当の割合がジェットであることもある。また、ブラックホールのジェットによって局所的な環境が受ける仕事量は、実際にすごい影響をおよぼすことになっているといいてよい。

ブラックホール周辺への円盤の集積と非熱力学的過程との結びつきが求められるときに、X線のブラックホールから放射が促されることのようなのである。そのかわり、このことを考慮することによって、X線や中波帯の放射によってブラックホールにおける流入と流出を調べることができるようになり、両者の相関についても見当をつけることができるようになるということである。星間物質やガスの力学のよって、ブラックホールに拘束されている質量の実態がわかるはずである。

これまでの、過去数年の間に、ブラックホールの質量、X線輝度および中波帯輝度の非線形的相関が、まったく相互に独立した、ふたつのグループによって明らかにされた(Merloni et al., 2003; Falcke et al., 2004)。この関係は、たとえば、Meilini et al.(2003) の例によれば、X線輝度の対数 $[\log L_R]$ の対数(縦軸)と $L_X M = [0.6 \log L_X + 0.78 \log M]$ (横軸)とによって、ダイアグラムとして表示できる。ここに、 L_X はX線輝度であり、 M はブラックホールの質量である。このダイアグラムによれば、 L_R と $L_X M$ との関係は線形である。つまり、 (L_R, L_X, M) の三つのパラメーターがブラックホールの活動度をあらわす指数であることが分かる。このダイアグラムでは、星間物質ブラックホール、低イオン核放射、Seyfertの活発な銀河核、および、クエーサーのデータを示してある。そして、このダイアグラムから、ブラックホールの質量 M を太陽の単位であらわしたとき、データのプロットは、横軸の M を含む変数によって、銀河M32を境として、二つのグループに分かれることが認められる。

問題の基本的な点について述べることは簡単なことであるが、同時に、その内容には深遠なところがあることも確かなことである。ちなみに、チャンドラによって観測されたX線画像から、ブラックホールのX線輝度の分布を、宇宙の赤色偏変倚の関数として定量的に表示できる。つまり、宇宙の時間スケールを考慮に入れて、銀河の形状形成やその構造の時間的な成長過程にもっとも重要なものとしての、定常的なイオン放射密度の関与を定量的に捉えることが可能となるわけである。基本的問題は、ブラックホールについて運動学的輝度分布の組立てにとりかかるべき段階にあることである。これによって、ある銀河に属しているブラックホールの形状、あるいは、銀河群の付近に位置しているブラックホールの形状の新しい側面が見えてくることになる。

それでは、ジェットというものは、どのような効果をあらわすのであろうか。時間スケール

その周辺の時空構造に影響を与えるようなことはないことも分かった。むしろ、銀河のクラスターのような大きなスケールの現象に大きな効果を及ぼしているということも明らかになったといえる。また、さらに、付け加えるならば、ブラックホールは、銀河や宇宙の時間スケールで変化するような巨大スケールの構造に強い影響を及ぼしているということである。このような一連の現象の発見が、成功するまでの過程には、さあに今後のX線観測計画において、米国のConstellation-X計画のほか、ヨーロッパの宇宙開発機関の企画しているようなX線宇宙観測用スペクトロスコープの施設の整備などが必要である。このような計画の推進によって、一般相対論の検証も可能になるであろうし、また、ブラックホールも詳細にわたって明らかになるときがくるであろう。

なお、本文は、最近の米国の宇宙関連についての情報を中心にしてのべていたものであることを記しておかなくてはならない。の本やその他の各国においても、関連した問題について、多くの計画や研究が展開され、また、推進されていることも忘れてはならない。

References

- Balbus, S.A. and Hawley 1991 *Astrophys.J.*, Vol.376, p.214.
Blandford, R.D. and D.G.Payne 1982 *Mon.Not.R.Astron.Soc.*, Vol.199, p.883.
Brenneman, L.W. and C.S.Reynolds 2006 *Astrophys.J.*, Vol.652, p.1028.
DiMatteo, T., V.Sprigel and L.Hernquist 2005 *Nature*, Vol.604, p.604.
Fabian, A.C. et al. 2003 *Mon.Not.R.Astr.Soc.*, Vol.344, p.L43.
Falcke, H., E.Koerding and S.Markoff 2004 *Astron.Astrophys.*, Vol.414, p.895.
Forman, W. et al. *Astrophys.J.*, Vol.635, p.894.
Kraemer, S.B. et al. 2005 *Astrophys.J.*, Vol.633, p.693.
Madau, M.J. and M.J.Rees 2001 *Astrophys.J.Lett.*, Vol.551, p.L27.
Merloni, A., S.Heinz and T.Di Matteo 2003 *Mon.Not.R.Astron.Soc.*, Vol.345, p.1057.
Miller et al. *Nature*, Vol.441, p.953.
Miller, M.C. and D.P.Hamilton 2002 *Mon.Not.R.Astrn.Soc.*, Vol.330, p.232.
Miller, J.M. and C.S.Reynolds 2007 *Black holes and their environments*, *Physics Today*, American Institute of Physics(AIP), vol.60, No.8, pp.42-47.
Minutti, G. and A.C.Fabian 2004 *Mon.Not.R.Astron.Soc.*, Vol.349, p.1435.
Nandra, K. et al. 2006 *Astron.Notes*, Vol.327, p.1039.
Portegies Zwart, S.F. et al. 2004 *Nature*, Vol.428, p.724.
Reeves, J.N. et al. 2006 *Astron.Notes*, Vol.327, p.1079.
Shakura, N.I. and R.A.Sunyaev 1973 *Astron.Astrophys.* Vol.27, p.337.
Wilms, J. et al. 2001 *Mon.Not.R.Astron.Soc.*, Vol.328, p.L27.
Streblyanska, A. et al. 2005 *Astron.Astrophys.*, Vol.432, p.395.

後記

アルキメデスの時代には、現在の人類の興味を示すものはなにであるかは、変わっていないようである。当時の国王の命によって、金の王冠が本物か偽者かを確かめよと命じられ、入浴中に、大発見をし、現在までも、その名を残している。

ガリレオは、中世期リスト教世界のまっただなかで、裁きを受け、“それでも地球は動いている”と言ったといわれている。

ニュートンは、りんごが木から落ちるのをみて、万有引力の法則に気がついたという。

キューリー夫人は、机の上においた写真の乾板(ガラス板)を誰も触れないようにするために、乾板の上に石を置いて実験室を出たが、戻ってみると、石の下の乾板が感光していた。これが、放射性元素ラジウムの発見であるという。

このように、20世紀初頭、1930年代ころまでは、なにかの発見には、あるひとりの名が挙げられ、これは、ダーウィンの進化論、メンデルの法則、などなど、科学の多くの分野で認められてきた。あたかも、オリンピックにおける各種目の損記録のようである。しかし、1930年代以降は、個人による発見の例は顕著ではなくなってきたようにみえる。しかし、ほとんど、同じ時期に、同一の発見をするということが多くなってきている。

ラジウムは、自然放射性元素であった。このあと、人工放射性同位元素の発見は、元素の崩壊という過程における原子核エネルギーの利用の時代を開く鍵となった。原子爆弾は、その実用性を世界中に示す結果となり、現在の核兵器の時代につながっている。

このような科学的な発見は、人類に、新しい知識をもたらした。一方で、コペルニクスの天動説以来、地球の周辺のことについての発見も見られた。ガリレオは天球上の木星の運動を天体望遠鏡で追跡したりして、木星が惑星であることがわかる鍵を与えた。その後、太陽系の惑星の発見、彗星の発見、星雲の観測などと多くのことがわかってきた。1900年代後半には、地球の裏側との通信に電離層と電波とを利用することが可能となり、人工衛星が宇宙探査のために利用される時期となると、平行して発展してきた電子技術の応用によって、宇宙についての情報が得られるようになると、さらに、未知の探索へと人類の興味は尽きるところがないようである。

1930年代には南極問題に関連して“IPY(International Polar Year)”計画が実施され、また、1950年代には国際地球年“IGY(International Geophysical Year)”が計画遂行された。さらに、現在、地球についての観測研究は、国際協力のもとに、いろいろの地域の参加によって実施されてきている。2008年には、“IYPG(International Year of Planet Earth)”計画がスタートの予定といわれている。自然現象は、時間的空間的に長いスケールでつながっている。一時的な地球規模の計画事業は、未知の探索にインパクトをあたえるという面がある。それと同時に、宇宙の誕生や地球の誕生のことに加えて、これを契機に、地球や宇宙の未来についても新しい情報や知識がえられることになれば人類の夢も大きく膨らむことのなるものと期待されるものと考えられる。さらに、地球上の人類の活動範囲が、これまで以上に広いものとなって、これまで以上に、正確で、詳細な情報を基礎にした、宇宙的スケールの広汎で的確な予測が得られて、人類の安らかな生活が確保できる時代を造ることができるようになることが望まれる。

著者紹介

著者名：中村重久[Shigehisa Nakamura]

現在の研究活動：Fellow, Electromagnetics Academy(Cambridge, MA)

電磁気学アカデミー、フェロー

Fellow, Pacific Congress on Ocean Science and Technology

[略称：PAICON International(Honolulu, HI)]

太平洋海洋科学技術国際会議、フェロー

Life Member, American Geophysical Union(Washington, D.C.)

略歴：1933年ー長崎県出身

1958年ー京都大学卒業

1958-1963年ー京都大学大学院理学研究科在学

1963-1997年ー京都大学防災研究所在職

京都大学大学院工学研究科担当

京都大学大学院理学研究科担当

1978年ーハワイ大学客員上級研究員

1980-1981年ーオーストラリア政府 CSIRO 客員専門研究員

1992-1996年ー京都大学白浜海象観測所長

京都大学理学修士

京都大学工学博士

著者名：中村重久(Shigehisa Nakamura)

著書名：和歌山県 田辺市湊 674-2-A104

(Famille Villa-A104, Minato,

Tanabe, Wakayama Japan/646-0031)

印刷日：2007年11月20日

(2007 November 20)

著作物品：非売品