

宇宙環境利用と人類の将来（Ⅲ）

— 宇宙のしくみ —



宇宙航空研究開発機構

井口洋夫 監修

表紙の写真の説明

タイトル:ハイビジョンカメラ(望遠)による「地球の入り」の撮影映像

日付:2007/11/07

場所:月南極付近高度約 99km～104km

ミッション:月周回衛星「かぐや(SELENE)」

宇宙航空研究開発機構特別資料
JAXA Special Publication

宇宙環境利用と人類の将来(Ⅲ)

— 宇宙のしくみ —

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

本書を読んで下さる方へ

1957 年、人工衛星が地球を周回して 50 年、現在われわれ人類が宇宙開発にかけて来た努力が、その中間基地であり、また宇宙環境利用の拠点となる国際宇宙ステーション (ISS) として、結実完成する最終作業が進められている。その作業の中に、日本の実験棟 (きぼう) の構築が含まれており、更に 2008～9 年にかけてその稼動が期待される。

そして、次の 10 年、この分野に携わる者は今迄蓄積した「宇宙環境利用の科学実験」の手法を遺憾なく発揮して、その成果を世に問うことが求められている。

ここに至るまでの段階で、宇宙環境利用研究の舞台づくりや推進役を荷った宇宙開発事業団 (NASDA) は、1996 年以降宇宙環境利用研究システム並びにセンターを設置、そこに広い学術分野—理工系、生命系そして医学系といった—の人材が集い、更に目的を同じくする大学・研究機関の研究者・技術者との全面的協力を行い、日本全国で 200 余課題の宇宙実験を実施して来た。

そして、そこには様々の新しい発想の誕生が集約され、新規課題も累積されている。

これから、いよいよ本格的宇宙実験を実施しようとしている今、これらの実験を通して、「この奇跡と言うべき美しき星—地球—に生を受けた人類の将来を考える」ことは、「未知なるものへの挑戦」という立場からも意義深いものとする。

このような思いで、執筆者各人が自分の思索を率直に文章に込めて書き上げた作品で、教科書を目指すものでないことを理解いただきたい。

読者の方々も、是非執筆者と共に、宇宙環境の中に飛び込んで下さって、その独特な環境を楽しみながら空想を逞しくして戴ければ、本書の出版の意義を満たすことが出来ると考えている。

是非頁をめくって戴き、従来の本との相違点を読み取って戴きたい。

井口 洋夫

目 次

本書を読んで下さる方へ	1
1. 序論(執筆:三原建弘)	1
1.1 宇宙とはどのようなものか	1
1.1.1 時間	1
1.1.2 いろいろな宇宙	1
1.1.3 暦(こよみ)と天文	2
1.2 宇宙から地球をみると	3
2. 宇宙のしくみ	7
2.1 古代からルネッサンス時代の人々の宇宙観(執筆:三原建弘)	7
2.1.1 古代文明の宇宙観	7
2.1.2 日食・月食	8
2.1.3 丸い地球	9
2.1.4 天動説	9
2.2 コペルニクス革命からニュートンまで(執筆:三原建弘)	10
2.2.1 ケプラーの第3法則の実際	11
2.2.2 火星への行き方 — ホーマン軌道 —	13
2.2.3 なぜ月は落ちてこないか?	15
2.2.4 無重力	16
2.3 現代の宇宙観(執筆:三原建弘)	18
2.3.1 太陽系のでき方	18
2.3.2 月のでき方 (月の起源説)	19
2.3.3 宇宙の広がり	22
2.3.3.1 渦巻星雲は銀河星雲か島宇宙か	24
2.3.3.2 距離を教えるセファイド変光星	25
2.3.3.3 オルバースのパラドックス	26
2.3.3.4 ハッブルの法則	27
2.3.3.5 ハッブルの法則の意味	29
2.3.3.6 ビッグバン	29
2.3.3.7 ビッグバン宇宙	30

2. 3. 4	恒星の一生、いろいろな天体	34
2. 3. 4. 1	主系列星	41
2. 3. 4. 2	赤色巨星	41
2. 3. 4. 3	赤色超巨星	42
2. 3. 4. 4	惑星状星雲	42
2. 3. 4. 5	白色矮(わい)星	42
2. 3. 4. 6	球状星団	43
2. 3. 4. 7	中性子星	44
2. 3. 4. 8	ブラックホール	47
2. 3. 5	星のエネルギー源	48
2. 3. 5. 1	星のエネルギー源	49
2. 3. 5. 2	星が爆発しないわけ	50
2. 3. 5. 3	太陽の核融合	51
2. 3. 6	元素合成 ―みんな星の子―	54
2. 3. 7	われわれの銀河, ドレークの式	55
2. 3. 7. 1	われわれの銀河(天の川)	55
2. 3. 7. 2	ドレークの式	58
2. 3. 8	遠方に存在する天体	61
2. 3. 8. 1	宇宙の階層構造	61
2. 3. 8. 2	電波銀河	62
2. 3. 8. 3	クエーサー	63
2. 3. 9	宇宙の歴史・未来	65
2. 3. 9. 1	宇宙の始まり	67
2. 3. 9. 2	宇宙の未来	68
2. 3. 9. 3	超ひも理論	68
2. 3. 9. 4	その前は, 量子宇宙	68
2. 4	現代の天体観測装置(執筆: 上野史郎、富田 洋)	70
2. 4. 1	光や赤外線望遠鏡	70
2. 4. 1. 1	ケック望遠鏡	70
2. 4. 1. 2	すばる望遠鏡	72
2. 4. 1. 3	VLT望遠鏡	73
2. 4. 1. 4	ジェミニ望遠鏡	74
2. 4. 1. 5	ハッブル望遠鏡	75
2. 4. 1. 6	スローンデジタルスカイサーベイ(SDSS)	76
2. 4. 2	X線の天文台	78
2. 4. 2. 1	あすか衛星	78
2. 4. 2. 2	すざく衛星	79

2. 4. 2. 3	チャンドラ衛星	80
2. 4. 2. 4	XMM-ニュートン衛星	80
2. 4. 3	スーパーカミオカンデ	81
2. 4. 4	天体観測の将来計画	83
2. 4. 4. 1	NeXT衛星計画	83
2. 4. 4. 2	ASTRO-F(別名 IRIS:Infrared Imaging Surveyor)計画	84
2. 4. 4. 3	全天X線監視装置 MAXI(Monitor of All-sky X-ray Image)計画	84
2. 4. 4. 4	James Webb Space Telescope (旧名:Next Generation Space Telescope)	85
2. 4. 4. 5	アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 ALMA 計画	86
2. 4. 4. 6	大型X線天文衛星 XEUS	86
2. 5	現代天文学のトピック(執筆:上野史郎、富田 洋)	88
2. 5. 1	星の誕生	88
2. 5. 2	宇宙でもっとも遠い天体	89
2. 5. 3	ガンマ線バースト	90
2. 5. 4	元素の工場	91
2. 5. 5	ジェット	93
2. 5. 6	太陽	94
2. 5. 7	太陽系外惑星	95
2. 5. 8	銀河団、超銀河団	96
2. 5. 9	ダークマター	98
	参考図書(易から高度へ)	99
参考	宇宙環境利用と人類の将来(Ⅰ)- いきものの星・地球 - 目次	100
参考	宇宙環境利用と人類の将来(Ⅱ)- 宇宙に住む、宇宙から地球をみる - 目次	102

[宇宙環境利用と人類の将来 編集者紹介]

井口洋夫:宇宙航空研究開発機構 顧問

佐藤温重:元宇宙航空研究開発機構 アドバイザー

中島英彰:国立環境研究所 総括研究官

三原建弘:理化学研究所 研究員

山本昌孝:宇宙航空研究開発機構 主幹研究員(編集まとめ)

[宇宙環境利用と人類の将来(Ⅲ)- 宇宙のしくみ - 執筆者紹介]

三原建弘:理化学研究所

上野史郎:宇宙航空研究開発機構 主任開発員

富田 洋 :宇宙航空研究開発機構 主任開発員

1. 序 論

1. 1 宇宙とはどのようなものか

「宇宙」とは何でしょう。もともとの「宇宙」の漢字の意味は「宇」とは前後・左右・上下の空間を、「宙」とは現在・過去・未来の時間を表します。つまり宇宙とはこの4次元世界すべてということになります。

1. 1. 1 時間

皆さんは小学校入学くらいから今までの出来事を覚えていますが、でも時間は皆さんが小学校に入学した時に始まったわけではなく、その前から今と同じように流れていたのです。私は皆さんが生まれる前のことを覚えていますが、確かにそうでした。お父さんの時も、亡くなったおじいさんの時もそうだったと思います。こういう風に類推したり共感したりすることで人間は個体の寿命より長い時間を認識することができるのです。文字や絵を通して昔の人の体験を、100%ではないけれどある程度、体感することができます。

遺跡を通して我々はまだ文字をもたなかった頃のことを知ることができます。化石を通して我々は人がまだサルや、カエルや、サカナだった頃のことを推測することができます。地球自身や他の惑星を調べることでまだ生命が生まれていなかった頃のことを推しはかることができます。宇宙の様子を調べることで、まだ地球が生まれる前、恒星も生まれる前、のころを推測することができます。宇宙の最初の最初は？ そう思う理由は？

というわけで皆さんはたかだか20年の歴史を知っていることに満足しないで人類の4000年の歴史、地球の45億年の歴史、宇宙の137億年の歴史を知り、身近に感じてほしいと思います。遠くで星が爆発したって我々には無関係だと思うかもしれませんが、宇宙の歴史はすべて、あなた自身に受け継がれているのです。

1. 1. 2 いろいろな宇宙

現在では高度 100km 以上の場所を宇宙と言うようです。そこから 137 億光年まで宇宙なので、宇宙の中にもいろいろな宇宙があります。スペースシャトルが飛んでいる高度 300km やアポロが行った月、つまり人が行ける宇宙。木星や土星を探索したボイジャー探査機のように探査機で探れる宇宙。恒星や銀河のように望遠鏡で観測できる宇宙。ビッグバンやインフレーションのように推測できる宇宙。これらを一言で宇宙というには内容が違いすぎるので、宇宙工学、地球惑星物理、天文学、宇宙論という名前がついています。英語では space, cosmos, universe とちよつとずつ違った宇宙に対する言葉があります。

地球という星の表面のごく一部で一生を終え、ましてや普通はたった 100km でさえ飛び

出せない人類が、今や百億光年もの宇宙を認識できているのは驚くべきことです。ここからくる光はまだ人類がいなかった頃、地球さえもできていなかった頃、地球を作る石や鉄さえできていなかった頃に出た光なのです。でも覚えておいてほしいのは、大望遠鏡でしか撮影できないような百億光年もの宇宙も、毎晩みなさんが見上げている星空の中に確かにあるのです。

1. 1. 3 暦(こよみ)と天文

1日とはどういう時間ですか？ 突然聞かれると当たり前すぎて我々は戸惑ってしまいます。「24時間です。」じゃなぜ24？とか1時間は？ これじゃあどうどう巡りですね。「朝から朝まで」そう答えたあなたは偉い。そうです太陽が決めているのです。でもそれでは江戸時代の人です。江戸時代には日の出が卯(う)の刻(こく)、日の入が酉(とり)の刻でした。そして夜を6等分、昼を6等分に分けて刻を付けます。深夜が子(ね)の刻、正午が午(うま)の刻。正午より前は「午」前、後ろは「午」後。午前午後は、皆さん語源も知らず日常的に使っていますよね。それから「草木も眠る丑三つ時。」春分の場合、子の刻は0時から2時まで、丑の刻は2時から4時までになります。その間を4つに分け、丑一つ(2:00)、丑二つ(2:30)、丑三つ(3:00)、丑四つ(3:30)としました。よって「丑三つ時」は、春分の場合には、午前3時です。(子の刻を23時から1時とする説をとると、丑三つ時は2時です。)夏と冬で丑三つ時の時刻は前後しますが、いつの季節でも丑三つ時は「夜の真っ只中で暗い」のです。日の出はいつでも卯の刻なのです。便利ですね。夏は寝不足になりますが。

まあ日常生活はそれで十分なのですが。皆さんは夏の日の出は早く、冬は遅いことを知っていますね。じゃあ「太陽の南中から南中まで」こう答えたあなたは小学校の理科で合格です。でもこっそり教えると、太陽の南中はいつも12時ではないんですよ。2月上旬には11時45分に南中し、5月には遅くなり、8月には早くなり、11月上旬にはまた遅くなって12時15分に南中します。均時差(きんじさ)といいます。ですから1日は「南中から南中までの時間を1年で平均したもの」です。

さて1日はこうして主に地球の自転の速さで決まりますが、1日はいつも24時間なのでしょうか？ いいえ。原子時計で精度良く測ってみると困ったことに、1日はだんだん長くなっていたのです。潮汐の摩擦で地球の回転エネルギーが減っていることが原因です。さらに暖冬で北極や南極の雪がたくさん解けると自転が遅くなっていました。雪が解けて地球の自転が遅くなるなんて本当だろうかと思う方もおられるでしょうが、本当なのです。それほどまでに時間を計る技術が進歩したということです。こんなですから遅くなり方は年毎にばらつきます。そこで実情に合わせて、必要になったときに世界時の6月か12月の最終日の最終秒に「うるう秒」を入れています(日本時間だと7月1日か1月1日の午前9時の直前です)。最近では日本時2006年1月1日に1999年1月1日以来7年ぶりに「うるう秒」が挿入されました。

そもそも機械仕掛けの時計というものはガリレオ＝ガリレイが振り子の等時性を発見す

るまで存在しませんでした。1600年頃のことです。ではガリレイは、振り子が振れる時間が、振幅やおもりの重さによらず同じというのをどうやって測ったのでしょうか？ それは自分の脈拍を使いました。もっとも身近にある時計ですよ。1秒の起源もおそらく脈拍の速さであると考えられます。60秒とか60分とか24時間はメソポタミア起源で1日と1秒の整合性をうまくとるように決めたのでしょう。今はセシウム 133 という原子から出る光が9192631770回振動する時間を1秒としています。余談ですが、生物が感じる時間の速さとか生物の寿命の長さとかは脈拍で決まっているという話もあります。ねずみは脈拍が速く、象は遅い。君たちが蚊をたたくスピードも、蚊から見るとスローモーションに見えているかもしれません。

1日の他にも、1年と1ヶ月は天体に関係した量ですね。1年は地球が太陽の周りを回る時間、1ヶ月はもともとは新月から新月までの時間です。この3つはお互いに全然関係ない偶然の量です。それをうまい具合に組み合わせて、現在の暦(カレンダー)ができています。もし月がなかったらまったく別のカレンダーができていたことでしょう。夜明けにシリウスが見え始める日を1年の始まりとしたエジプトでは、1年が365日というのは古代エジプトの時代から知られていました。年によっては366日のこともあるので、もうちょっと長いということは紀元前から知られていたようです。BC46年ユリウス=カエサル(英語読みジュリアス=シーザー、シェークスピアの戯曲にでてくる「ブルータス、お前もか！」で有名)は、4年に1回うるう年をいれた暦を採用しました。これをユリウス暦といいます。これで1年は365.25日ということになります。1年は正確には365.2422日ですから、これで1年間に0.0078日しかずれません。128年に1日のずれです。

しばらくこれでよかったのですが、さすがに1600年もたつと本来の暦と12日もずれてしまいました。キリスト教には正確な暦が必要です。たとえば復活祭(イースター)は、春分後の満月直後の日曜日と決まっています。春分は太陽暦、満月は太陰暦、七曜制はどちらも違う第3のものです。そこで1582年にはグレゴリオ13世は暦を作り直し、100で割り切れる年はうるう年をやめ、400年で割り切れる年はうるう年とするという規則を追加しました。これが現在も使われているグレゴリオ暦です。西暦2000年は2回目の「400年のうるう年」でした。これで1年は365.2425日となるので、3000年に1日ずれる程度の正確さになります。これで春分は毎年3月21日ごろになります。当面変えなくてもいいでしょう。

このように暦を通して、天体現象は我々の生活の中に入り込んでいます。今使われている星座もオリジナルはメソポタミアまでさかのぼります。「第2章 宇宙のしくみ」では、まず古代の世界からさまよってみましょう。

1.2 宇宙から地球をみると

宇宙に出て地球を眺めることは、私たちの人類が地球上に生れて以来の夢でした。ロケットと宇宙船技術の進歩によりそれが実現されるようになってからは、有名な世界初の宇

宇宙飛行士ガガーリンの「地球は青かった」という言葉に象徴されるように、多くの宇宙飛行士が宇宙から地球の現在の姿を自分の目で見、その神秘的な光景に感嘆してきました。低く巨大な影を引くエベレスト山、千変万化の砂模様を見せるサハラ砂漠、雪をいただく美しい富士山、そして、神秘的なオーロラの輝き。

そしてまた最近では、台風やハリケーンなど、猛威を振るう自然現象のモニタリングだけに止まらず、人間が地球に刻んだ傷跡も宇宙から確認出来るようになってきました。たとえば、天損流域等熱帯での森林伐採の様子や、過度の伐採の結果保水力を失い、海に洗い流される表土の様子など。また、特殊な観測装置を用いることにより、直接目では判別できないような地球の環境変化の様子も判るようになってきました。例えば、南極大陸上空でオゾン層にぽっかり穴のように口を広げた巨大なオゾンホールの様子や、人口集中域の工業活動や森林火災等のバイオマス燃焼によって排出される、有害な窒素酸化物や硫黄酸化物の分布の様子、海上の風速や海面水温、プランクトンの多さ等々。

このように、宇宙から地球を観測することによって、さまざまな地球環境の変化の様子を知ることが出来るようになってきました。

宇宙から地球の様子を調べる技術を、「リモートセンシング(遠隔計測)」と呼びます。これは、離れた所から直接触れずに、対象物を同定あるいは計測し、またその性質を分析する技術のことです。最近では、数多くの人工衛星や国際宇宙ステーションから地球環境の観測が行われています。天気予報などでおなじみの「ひまわり」の画像も、リモートセンシング技術の応用のひとつです。「ひまわり」は日本の南、赤道上 35800 km の高度にあり、地球の自転の同じ速度で地球の周りを回っている(つまり地上からは止まっているように見える)静止衛星です。図 1.2-1 に、宇宙からのリモートセンシングによって得られる情報の例を示します。

宇宙から地球環境をリモートセンシングすることによって、さまざまな情報を得ることが出来ますが、それらの多くは地上観測を行うことによっても得ることが出来ます。ではどうしてわざわざ宇宙から観測を行うのでしょうか？それは、宇宙から観測を行うことによって、以下のような利点を得ることが出来るからです。

- (1) 地球上の広い範囲を一度に捕らえることが出来る。
- (2) 同じ品質のデータを、高い頻度で長期間にわたって得ることが出来る。
- (3) 地球大気に邪魔されないために、多様な情報を同時に得ることが出来る。

リモートセンシングによって対象物から何がしかの情報を得るためには、対象物が吸収、反射(散乱)、または放射する光もしくは電波(あわせて電磁波という)が主に用いられます。



図 1.2-1 宇宙からのリモートセンシング (<http://www.restec.or.jp/jpn/data/data.html>)

また、これら電磁波を観測する装置をセンサといい、これらのセンサを搭載する人工衛星などの移動体をプラットフォームと呼びます。ちなみにリモートセンシングという言葉は、1960年代にアメリカで作られた技術用語で、それ以前に使用されていた写真測量、写真判読、写真地質などを統合した形で提唱されました。

リモートセンシングによって電磁波の観測から、大気や海洋、雲や地表の対象物の様子を判読・解析できるのは、「全ての物体は、種類および環境条件が異なれば、異なる電磁波の吸収、反射、または放射の特性を有する」という物質の電磁波との相互作用特性に基づいています。つまり、リモートセンシングとは吸収、反射、または放射される電磁波の固有性に着目し、電磁波を観測して、物体の識別やそれが置かれている環境条件を把握する技術であるといえます。

リモートセンシングは、その観測方式から大きく2つの種類に分けられます。つまり、「受動型リモートセンシング」と「能動型リモートセンシング」です。図 1.2-2 にこれらの観測方式の概念を示します。

「受動型リモートセンシング」とは、太陽光、もしくは地表や大気が発している電磁波が、地表面や雲、大気分子等によって反射（散乱）、もしくは吸収を受けてきたエネルギーをセンサが受信する観測方法です。これは、比較的分解能（地表を細かいところまで、また大気組成の高度分布を分解する能力）が高く、また、多くのバンド（波長の種類、紫外線、可視光線、赤外線、マイクロ波、サブミリ波、電波等）を扱えるセンサが開発されています。バンドの組み合わせによっては、人間の眼で見たのと同じようなカラー画像を作成することができます。

もう1つの「能動型リモートセンシング」は、センサ自体が電磁波（マイクロ波やレーザー光等）を地表に向けて発射し、それが地表や大気によって反射（散乱）されてセンサの方向に戻ってきたものを受信する方式です。この方式の特徴としては、目的とする物理量を正確に測ることが出来るという点が上げられます。

本シリーズ（Ⅱ）—宇宙に住む、宇宙から地球をみる—第3章において最新の数々のリモートセンシング技術の紹介と、それによって明らかとなってきた地球環境の変化の様子について述べ、将来の展望についても説明をしました。

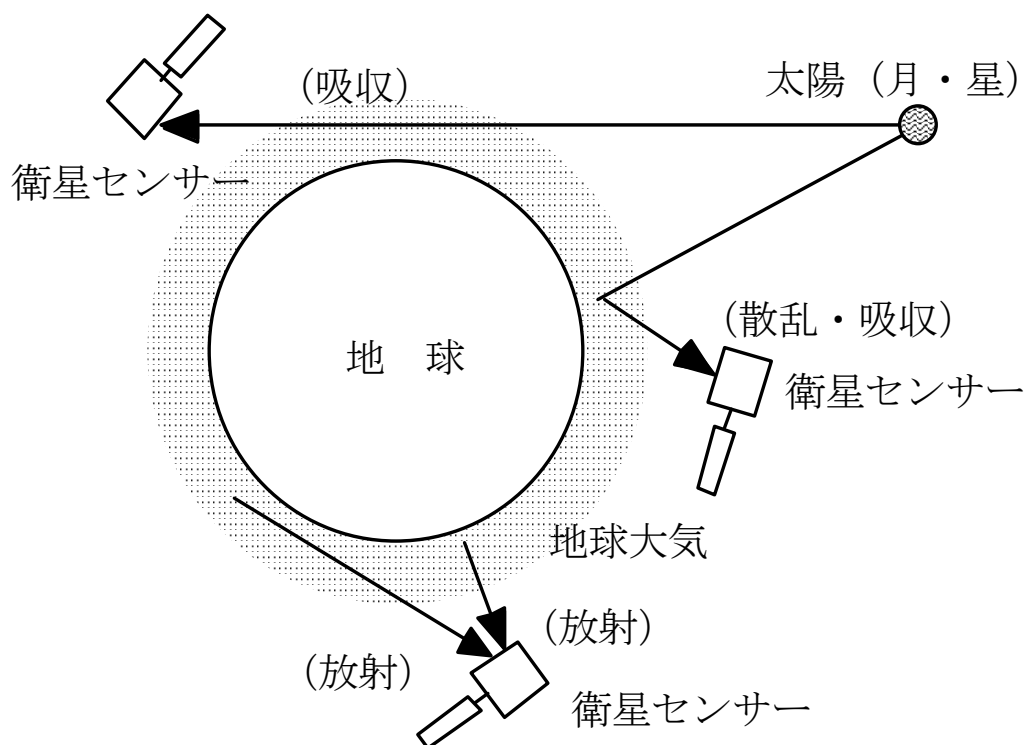
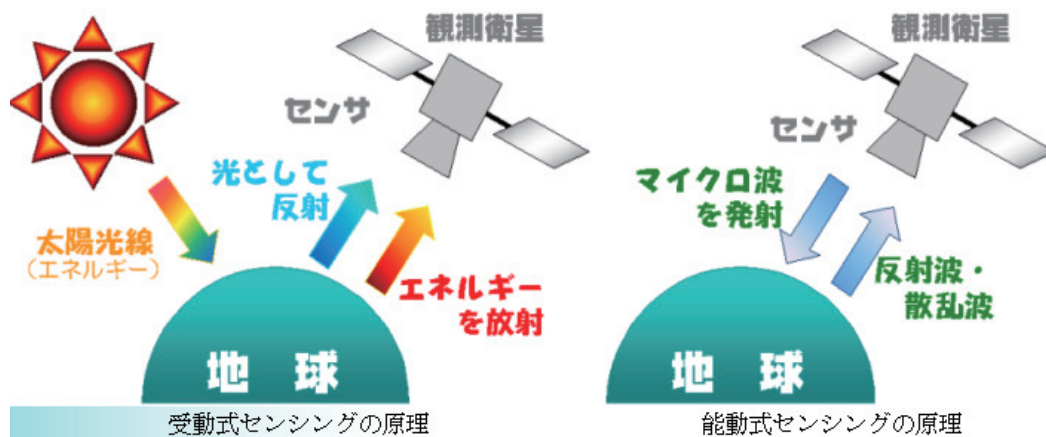


図 1.2-2 リモートセンシングの原理

2. 宇宙のしくみ

この章では宇宙のしくみを概観します。最初の節では、人類がどのように世界をとらえてきたかという宇宙観の変遷を紹介します。昔の人はバカだったなんて思っはいけません。昔の人はそれなりの理由があっそう思っていたのです。あなた自身もその時代に生まれていたら、もっともらしくそう思っはいはずですから。昔の人は真実の姿を知らなただけです。そして、我々だっ未来の人から見ればきつと真実の姿を知らないことでしょう。昔の宇宙観と今の宇宙観の違いを知れば、われわれがまだ知らない真実の姿を知るためには何が必要なのかが見えてくるかもしれません。人類が無知から学んできた道は、あなた方が生まれてから学んできた道と似かよっていることでしょう。

2. 1 古代からルネッサンス時代の人々の宇宙観

4大文明に代表される古代、移動の手段と言え歩か、馬やらくだしかありませんでした。そんな時代の宇宙観は自分が生まれ育った場所を中心に自分の感じ方のままにできていました。ちょうどあなた方が小さかったころ、自宅の回りが世界の全てで、近くの町やましてや東京やニューヨークなど「どこかとおく」に過ぎなかつたように。。。古代は夜には明かりもなく野獣もいて病気も蔓延してたでしょう。太陽の光や洪水など我々が太刀打ちできない力に対する恐れから神というものが感じられたのでしょう。キャンプなどで夜まっ暗な中に取り残された経験はありませんか？ 人類が生まれてかれこれ30万年、彼らは彼らなりの宇宙を考えて生きてきたでしょう。しかし残念ながらわれわれは彼らの考えていた宇宙を知ることできません。遺跡の絵や文字となっ残されている古代文明ができてから、初めてそれをたどることができます。

2. 1. 1 古代文明の宇宙観

エジプトでは太陽が神でした。国を治める王は太陽神と同一視されました。それはおそらくエジプトが雨の降らない乾燥地帯だったからでしょう。1年の $\frac{1}{3}$ はナイル川の水かさが増えていき肥沃な土が運ばれ、 $\frac{1}{3}$ は洪水が引いていき、 $\frac{1}{3}$ は乾燥した季節が続く。この四季のサイクルから1年を365日とする太陽暦が生まれました。夜明けにシリウスが見える時が1年の始まりでした。今でいうと7月のはじめ頃です。それからナイルの洪水が始まるのです。

メソポタミアでは月の神が主でした。1ヶ月は30日、約4週間。1年は約12ヶ月。カレンダーも時計もない時代、空を見るだけで日にちが分かる月というものはとても便利なものでした。日本でも明治5年まで使っていました。5惑星に日月を加えて七曜制が生まれました。羊飼いたちから星座が生まれました。星座はその後ギリシア神話とも結びついて、いろいろな時代のいろいろな地方の混ぜ合わせになっています。時間や角度を示す60進法も生

まれました。これらは現在でも使われています。小学校の頃、なぜ時間や角度は60だの360だの使うのだらうと思いましたが、どうもこの辺に起源があるようです。4000 年前といえども無関係ではありません。

古代インドには、世界の真ん中には須弥山(しゅみせん)がそびえ、半球状の大地は象によって支えられ、象は巨大なカメの上に立っていて、カメは巨大なヘビの上に乗っているという世界観がありました(図 2.1-1)。須弥山はヒマラヤ山脈でしょう。象は最も力持ちの動物、カメやヘビは神格化されている動物です。古代中国では、太陽がめぐる球殻の中に水が半分入っていて、水の上に平らな大地が浮いているという宇宙観がありました。水は渤海や黄海でしょう。太陽の動きから宇宙は球と考えたわけです。

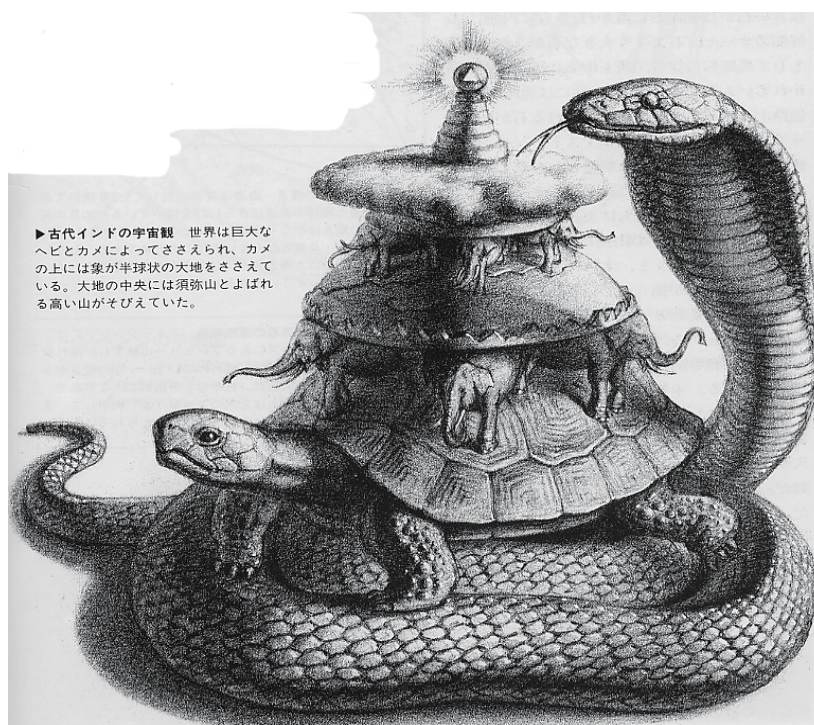


図 2.1-1 古代インドの宇宙観
(スペース・アトラス 宇宙のすべてがわかる本、三品隆司、PHP 研究所)

2. 1. 2 日食・月食

日食や月食は驚きです。日ごろ決して欠けることのない太陽や満月が何の前触れもなく欠けていくのですから。天文官たちは将来の日月食を予言するため過去の日月食の周期性を見つけようとしていました。その1つであるサロス周期というのは紀元前から知られていたようです。これは同じような欠け方の日月食が18年と11日と8時間(間にうるう年が4回ある場合。うるう年が5回ある場合は18年と10日と8時間)の周期で起こるというものです。この周期は地球の公転、月の公転で決まっている偶然の周期で何ら特別の意味があるわけではありません。月の公転周期は長くなっていますから、年月が経つと変わっていきます。

人生が40年ほどの時代、18年もの周期をよく見つけたものだと思います。しかもその時、月や太陽が地平線下にあれば日食月食は見えないのですから、ほぼ同じ時間に繰り返すのは3サロス周期後つまり54年後になります。でも 1800 年前にこれさえ知っていれば、あなたも預言者・卑弥呼になれたでしょう。

2. 1. 3 丸い地球

さてその月食のとき月面に映る地球の影は丸みを帯びていますね。太陽のちょうど反対側に月がきたとき月食となりますから、あの影は地球の影である。影が丸いから地球も丸いに違いない。古代の人もそう思いました。水平線に遠ざかる船はいつも船底の方から消えていき、最後にマストが消えます。これは地球が大きな球だからだと考えました。

ギリシア時代 BC200 年ごろエラステネスという人がいました。夏至の日にシエネという町では太陽が真上に来て影がなくなります。でも北方にあるアレキサンドリアという町では影は消えません。影の角度は7.2度。なぜか？「それは地球が丸いからだ。」とエラステネスは考えました。すると2つの町の距離は 5000 スタディアなので、地球1周は $5000 \div 7.2 \text{度} \times 360 \text{度} = 25 \text{万スタディア}$ である、と計算しました。これは4万5千 km で現在の値 4 万 km と比べても1割違っているだけの正確な値でした。

日本では夏至の日に影がなくなるところはありません。なくなるから、日本ではどうせ地球の大きさは測れないな、なんて考えた人がいたら間違いです。どこでも、そして夏至の日でなくてもいつでも、南中時の太陽の高さの差を測れば地球の大きさは求められるのです。ただ影がなくなるという特殊な出来事が、人々になぜだと考えさせたということはあるでしょう。

2. 1. 4 天動説

ローマ時代以降1600年間は、宇宙観はプトレマイオスの宇宙で表される天動説でした。中心に地球がじっとして、そのまわりを水星、金星などの惑星や月、太陽がそれぞれのスピードで動き、一番遠くに恒星が張り付いている球があって、全体が1日で回っています。天動説は自然な感覚ともキリスト教会の教義ともマッチし広く信じられました。

ギリシア時代にはアリストアルコスなど、地球が太陽の周りを回っているという地動説の考え方もあったのですが、「世界は動いていないではないか。(今でいう)自転や公転をしていれば振り落とされてしまうはずだ」という意見に説得されて、地球は動かないという天動説が信じ続けられました。惑星の動きを説明するため天動説はどんどん精密になっていき、プトレマイオス(紀元2世紀)は約80個の円を使って動きを説明しました(図 2.1-2)。見かけの惑星の動きを計算できれば天動説でも地動説でもかまわないわけで、観測革命が起こる16世紀まで天動説が信じられました。

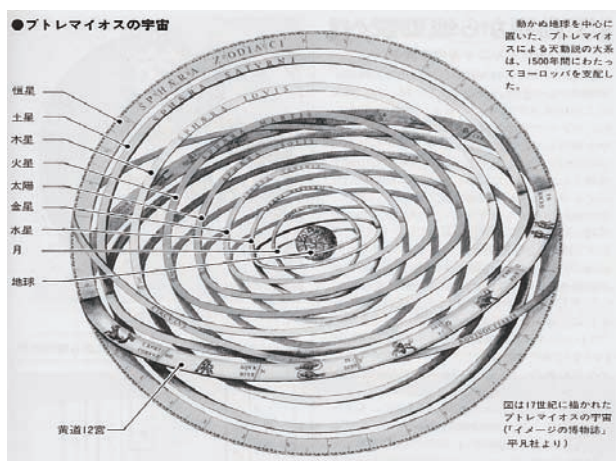


図 2.1-2 プトレマイオスの宇宙

(スペース・アトラス 宇宙のすべてがわかる本、三品隆司、PHP 研究所)

2. 2 コペルニクス革命からニュートンまで

人間が望遠鏡や写真、数学や物理などの新しい道具を手に入れるたびに、宇宙に対する考え方も少しずつ変わってきました。その中でも大変革は、コペルニクスの地動説と、ニュートンの重力の法則、アインシュタインの相対論、ハッブルの宇宙膨張でしょう。でも大発見かどうかなんて後の人が歴史を振り返って判断することで、今現在でも大発見が生まれているかもしれませんよ。さて時代は16世紀。日本では大河ドラマでおなじみの戦国時代でしたが、ヨーロッパでも新勢力台頭の時代でした。そして宇宙観においても変革が起こりました。

1543年、鉄砲伝来の年に、ポーランドのコペルニクスは「天体の回転について」という本を著し、太陽中心の宇宙について述べました。地球を含めた惑星が太陽の周りを回っていると考えたほうが計算が簡単になるということです。太陽から水星、金星、地球、火星、木星、土星の順に配置しました。現在の配置と同じですね。ただしこのとき月だけは地球の周りを回っているとしました。彼自身はキリスト教の僧侶で若いときにイタリアに学び、帰国後も天文観測を続けました。その結果、太陽中心の考えに至ったようです。これはキリスト教の教えには反することでした。しかし彼は教会よりも神を信じていたのでしょう。神の宇宙を理解したかったのです。この本は数学的な内容であり彼は同年に亡くなっているのにキリスト教による迫害を受けることはありませんでした。

チコ(1546－1601)は肉眼最高の精度で惑星の位置を観測した人と言われています。その弟子にケプラー(1571－1630)という人がいました。ケプラーはチコが観測した火星のデータをもらいコペルニクスの方法で計算した結果と突き合わせました。しかしどうしても合いません。コペルニクスの宇宙では、惑星の軌道は、太陽を中心とし、等速で動く、円軌道であるとしたため、精度はプトレマイオスの宇宙とあまり変わらなかったのです。1609年ケプ

ラーは試行錯誤の結果、3つの美を多少崩せばよく再現できることを発見しました。それらは、

- 1) 惑星の軌道は円ではなく楕円であること。
- 2) 太陽は楕円の中心ではなく、焦点と呼ばれる点に在ること。(1と2合せて第1法則)
- 3) 惑星は等速ではなく、太陽からの見えない力に引っ張られて、近いときには速く、遠いときには遅く動くこと。ちょうど1日に進んだ軌跡と太陽を結んでできる三角形の面積がいつも等しいような速さで、動くこと(面積速度一定、第2法則)。

でした。ケプラーは円からのずれが大きいため従来のモデルでは合わなかった火星のデータを与えられ、ケプラーの法則を発見するに至った訳です。

ケプラーは10年後、「各惑星の公転周期の2乗と軌道長半径の3乗の比は一定である。」という第3法則(調和の法則)も発見しています。太陽から遠い惑星ほどゆっくり動くということです。これは今までになかった新しい法則で、70年後ニュートンの重力の法則から証明されることになります。

ガリレオ＝ガリレイはピサの斜塔の実験や振り子の等時性でも有名ですが、望遠鏡で初めて天体観測した人でもあります。1608年夏オランダで望遠鏡が発明されました。イタリアのガリレイはそれを聞き自分で望遠鏡を作り、軍隊に売ってもうけたりしました。彼は口径5cm30倍の望遠鏡を星空に向けました。そして月のクレーターや太陽の黒点、木星の周りを回るガリレオ衛星、土星の「耳」、金星の満ち欠け、天の川は暗い星の集まりであることを見つけました。このスケッチは1610年に刊行された「天界の報告」に書かれています。岩波文庫にも入っている歴史的書です。金星の満ち欠けは地動説の証拠となりました。彼は地動説を信じ、後年、宗教裁判に掛けられます。そこでしぶしぶ天動説を認めたあと「それでも地球は動いている」とつぶやいたという話は有名です。

ガリレイが亡くなったその年(1642年)イギリスで生まれたのがニュートンです。ニュートンのリンゴは有名ですが、「地上界のりんごも天上界の月も同じく物体であって、同じく地球に引かれている」ことに気づいたのがニュートンのまず偉いところでした。その引かれ方は、 $F=GmM/r^2$ であると定式化しケプラーの法則をそこから証明したのが2つめに偉いところです。コペルニクスからニュートンの一連の発見により、「重力の法則にのっとって、機械仕掛けのように規則正しく動く宇宙」というイメージが定着しました。これにより原理的には何千年前の惑星の位置も何千年後の惑星の位置も予言できるのです。

2. 2. 1 ケプラーの第3法則の実際

ケプラーの第3法則(調和の法則)は、公転周期 T の2乗と軌道長半径 a の3乗の比は一定であるというものです。惑星の軌道は第1法則で楕円になってしまいましたので、半径といっても一番長いところと一番短いところの2種類あります。その長いほうのことです。しかも太陽からの距離ではありません。太陽は焦点にいて中心にはいません。しいて太陽との関係で言えば、近日点距離と遠日点距離を足して2で割ったものが長半径です。

「 $T^2/a^3=一定$ 」(T 乗割る a 3乗は一定)。単位は統一的に用いれば何でもいいのですが、ここでは周期として「年」、軌道長半径として「天文単位」を用いましょう。地球は周期1年、軌道長半径は1天文単位なので、 $T^2/a^3=1$ になり計算が簡単なのです。

いろいろな惑星について、 T^2/a^3 を計算してみました。現在、冥王星より遠い天体が続々見つかри、太陽系の果ては100天文単位程度にまで広がりました。惑星の軌道はほとんど円で、彗星やカイパーベルト天体は細長い楕円です。下表より太陽に近かろうが遠かろうが、円であろうがひしゃげた楕円であろうが、 T^2/a^3 は1になっていることが分かります。

表 2.2-1 いろいろな惑星や彗星についての T^2/a^3 の計算

天体	平均周期 T[年]	軌道長半径 a[天文単位]	離心率 e	T^2/a^3
水星	0.2409	0.3871	0.2056	1.0005
金星	0.6152	0.7233	0.0068	1.0002
地球	1	1	0.0167	1
火星	1.8809	1.5237	0.0934	1.0001
木星	11.862	5.2026	0.0485	0.9992
土星	29.458	9.5549	0.0555	0.9948
天王星	84.022	19.2184	0.0463	0.9946
海王星	164.774	30.1104	0.0090	0.9946
冥王星	247.796	39.5403	0.2490	0.9933
ハレー彗星	76.4	17.99	0.967	1.0025
テンペル彗星	33.0	10.289	0.905	0.9998
1999CF199	1232	114.95	0.68608	0.9993

- ・ 値は理科年表より。
- ・ テンペル-タットル彗星はしし座流星群の母彗星。
- ・ 1999CF199 はカイパーベルト天体(海王星より遠くにある微惑星)の1つ。2000年4月時点で最遠のもの。
- ・ 離心率は、楕円のひしゃげ具合を表すもの。太陽は、楕円の中心から距離 ae 離れたところにいる。つまりハレー彗星の場合、太陽からの距離は近日点では $17.99 \times (1 - 0.967) = 0.59$ 天文単位、遠日点では $17.99 \times (1 + 0.967) = 35.4$ 天文単位である。近付く時は金星軌道のやや内側、遠ざかる時は土星軌道の外側まで旅するわけである。

2. 2. 2 火星への行き方 —ホーマン軌道—

NASAは20年以内に火星に人を送り込む計画を進めています。火星に行くには、ホーマン軌道と呼ばれる軌道が一番燃料が少なくて済みます。まず、地球の進行方向に、ちょっとスピードを付けてロケットを発射したとしましょう。すると軌道の反対側で一番太陽から離れ、そのまま放っておくとまた地球軌道に戻って来ます。もうちょっとスピードを上げると遠日点でもうちょっと遠くまで行きます。こうして遠日点でちょうど火星とランデブーできるようにした軌道がホーマン軌道です。加速が最低で済むことが分かるでしょう。

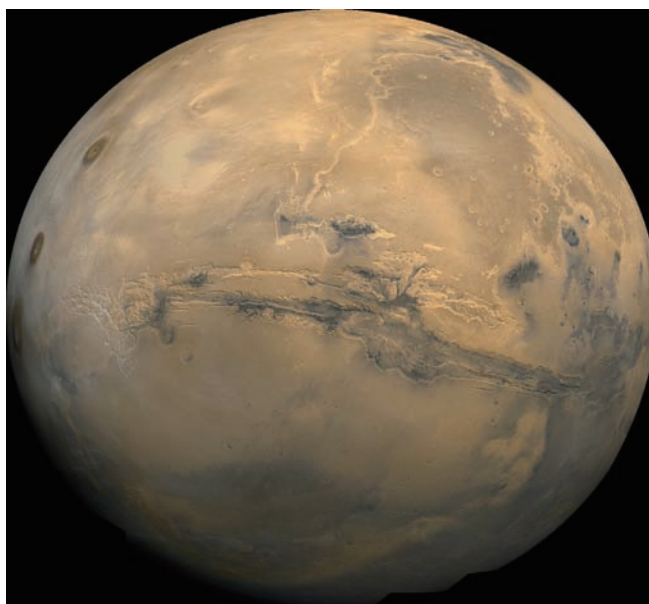


図 2.2-1 火星（マーズグローバルサバイヤーの写真から）

ホーマン軌道にするには地球軌道上で 3km/s だけ加速すればいいのです。これは地球が 30km/s で公転しているのを考えるとわずかな量です。火星に行くにはまず地球引力を抜け出し（そのためには地表で 11.2km/s 必要）そのあと、 3km/s の速度が地球の進行方向に残っているようにすればいいのです。つまり地表で 11.6km/s の速度をつけてやればいいことになります（2乗の和です）。ちなみに地球の回りの人工衛星にするには 7.9km/s の速度が必要です。

さてホーマン軌道をたどって火星に行くには、何日かかるか求めてみましょう。ホーマン軌道は楕円軌道なので難しいと思いますか？ 実は、ケプラーの第3法則を使えばあっという間にできるのです。

ホーマン軌道は、惑星の軌道と同じくやはり太陽を焦点とする楕円軌道です。

ホーマン軌道の長半径は、

(地球の軌道の半径+火星の軌道の半径)/2 = $(1+1.52)/2 = 1.26$ 天文単位。

ケプラーの第3法則 $T^2/a^3 = 1$ に代入して解いて、 $T = 1.4$ 年。

行くのはこの半分だから 0.7 年。つまり 255 日=8.5 ヶ月もかかるのです。

では、火星往復旅行には何年かかるでしょうか？

行くには 255 日。帰りも同じく 255 日。

では最短で合計 510 日でもいいかというと、そうはいきません。帰りにいつでも火星を出発できるわけではないのです。火星を出発して 255 日後に、ちょうど地球が、出発時の火星と反対側にいなければいけません。でないと地球軌道まで来ても地球がはずれ、着陸できません。着陸し損なうとそのままホーマン軌道をたどり、また火星に逆戻りです。さらにおそろしいことにはホーマン軌道の周期 1.4 年は、火星の周期 1.88 年と異なります。ホーマン軌道をたどって火星軌道まで帰って来ても そこに火星はいないのです。こうして、宇宙船はタイミング良く地球か火星に巡り合うまで、永遠に太陽の周りを周り続けることになるります。帰地球のタイミングを測るため、火星探検隊は、火星で 460 日滞在しなければなりません。火星旅行の概略はこのようになるでしょう。

1. 地球が火星の 45 度後ろにいる時に出発（角度は、太陽-火星と太陽-地球の線のなす角）。
 2. 255 日で火星に到着（到着時には、地球は火星の 72 度前にいる。地球の方が動きが速いので）。
 3. 460 日、火星に滞在。
 4. 地球が火星の 72 度後ろに来た時に出発。
 5. 255 日で地球に到着（到着時には、地球は火星の 45 度前にいる）。
- 合計 970 日。2 年 8 カ月の長旅です。

実際の飛行計画では、旅行にかかる時間をできるだけ短くしようとしています。火星の軌道は、ケプラーがケプラーの法則を導入せざるを得なかったように、実は結構つぶれた楕円です。火星が近日点にいるころ火星に到着するようにすれば、上記より飛行期間を短縮できます。

また、少し燃料を多く使って飛行期間を短縮できるなら、それを用いる可能性があります。火星での長い待ち時間が問題なので、帰りは燃料を多く使ってホーマン軌道以外の軌道をとることにすれば 460 日も待たなくて良いという計算もあります。ちなみに上記 1 の火星探検隊を送り出す出発のタイミングは、2 年 2 カ月ごとにやって来ます。

ソ連のポリャコフ宇宙飛行士は 437 日も宇宙（ミール宇宙ステーション）に滞在して生還しています。これは火星旅行の片道 255 日を念頭に置いています。もっとも普通の人にとっては、宇宙船内のような、通常と違う、ストレスの続く生活は 1 年が限度だろうという説もあります。海外旅行でジャンボ機に 12 時間乗って嫌になった人もいでしょう。睡眠不足など少々無理をして強行する海外旅行なら 1 週間が限度ですね。ただ、人による違いは非常に大きいです。アポロ宇宙飛行士たちはジャンボ機の座席より狭い所に 1 週間いました。しかも外は死の世界です。大航海時代の船乗りは、揺れる船の中に何ヵ月といました。それと似ているかもしれません。宇宙飛行士には、頭が良くて健康というだけでなく、このような資質も必要とされます。

2. 2. 3 なぜ月は落ちてこないか？

お月様もりんごも同じ物体です。りんごは木から落ちるのに、なぜ月は落ちてこないのでしょうか？ ニュートンはそれを考えましたが、答えは何なのでしょう？

答えは、「ちょうどよい速さ(1km/s)で横に動いているから」です。

実は月も落ちているのですが、地球が丸くて地面が遠ざかり、落ちた量と地面が遠ざかる量が同じなので、いつまでたっても地面までは落ちないのです。次節の計算で確かめてみましょう。地上にあるリンゴも横方向に秒速 7.9km で動けば落ちません。つまり人工衛星になります。ちなみにライフル銃の弾の速さは秒速 1km ですから、秒速 7.9km というのは並大抵の速さではないことは分かりますね。月もスペースシャトルも遊園地のフリーフォールも同じ自由落下です。水平に動いているのに「落下」というと違和感がありますが、重力に身をまかせた運動ということです。

○ 地球の丸さ

地球は半径 6400km の球です。その曲がりには 1km 進むと 8cm 落ちる計算です。L[m] 離れると H[m] 落ちる、あるいは高さ H[m] のものは L[m] 離れたところまで見える、とすると近似的に

$$H = L^2 / (2 R) \quad (\text{ただし } R \text{ は地球の半径})$$

で計算できます。

表 2.2-2 地球表面の曲がりぐあい

	L[km]	H
駅まで(1)	1	8cm
人	4.4	1.5m
東京タワー(2)	65	333m
富士山(3)	220	3776m
飛行機	360	10km
スペースシャトル(4)	2000	300km

(1)1km で 8cm の曲がりを、大きいと思いますか？ 小さいと思いますか？

(2)関東一円でテレビ電波が受信できるように高い塔を建てました。

(3)220km という志摩半島、仙台のあたり。ここより遠くではどうがんばっても、平地からは富士山は見えません。山に登ればもっと遠くからも見えます。

(4)2000km という日本列島くらいです。スペースシャトルからは決して地球全体は見えません。

○人工衛星

地上すれすれでも8km/s の速さで飛ばせば人工衛星になります。高校の物理で計算してみましょう。水平方向に8km/s ということは 1/8 秒間に 1km 進みます。

1/8 秒間に落ちる量は $(1/2)gt^2 = 1/2 * 9.8 * (1/8)^2 = 0.08m = 8cm$ です。
これは地球の曲がりと同じです。

実際問題、地表では空気の抵抗があって、すぐ遅くなってしまいます。人工衛星を飛ばしたければ、空気のない高空まで行って横にスピードアップする必要があります。一旦スピードがつけば、空気がない宇宙では遅くなることはありません。ロケットを噴射し続けなくてもいいのです。上に上がることでスピードをつけること、この2つがないと人工衛星にはなりません。これはシビアな話で 2000 年 2 月に M-V ロケットで打ち上げられた日本の Astro-E 衛星は 1 段目ロケットのノズル部の故障により、必要な速度 7.9km/s に対してわずか 50m/s だけ足りず、南太平洋に落下してしまったのです。このくらい私が後押しでもしてやりたい気分です。

なお月は地球から遠いので地球の重力も弱く、1km/s で衛星になります。

2. 2. 4 無重力

人間は重力そのものは感じないのではないのでしょうか。

人間が「重力」だと感じているのは、地面からの反発力でしょう。座っている時なら、いすから押される力、胃袋なら腸が押し上げてくる反発力です。各所各所のこれらの反発力が重力と釣り合って、人や胃袋はじっとしていられるのです。

地上で普通に暮らす以上、地面からの反発力を「重力」だと思っても差し支えはありません。2つの力は釣り合っているのですから。齟齬が起こるのは、地面からの反発力がなくなったときです。地面を取り去ると、人はもはや「重力」(実は地面からの反発力)を感じません。よって無「重力」だと思うのです。これが遊園地のフリーフォールに乗った時の感じですね。ふわっと宙に浮いた感じです。胃袋は腸からの反発力が来なくなるのでムカムカと気持ち悪くなります。でも、重力は働いています。だからどんどんスピードを増して落ちるのです。

宇宙船も地球に落ち続けています。地球が丸いので地面が近づかないだけで、実は自由落下です。だから宇宙船の中でも重力はありますが、人は「重力」(実は宇宙船の床からの反発力)を感じません。だからその人は「無重力」だと思うのです。

重量という言い方もあります。宇宙船の中では重力はあるが重量がない。よって無重量という言い方が正しいとされています。

さて、以上は頭のいい凡人の考え方です。アインシュタインは何と、重力に身を任せて自由落下している状態を「静止している状態」と考えました。我々の感じる気持ちと同じです。自由落下中は「重力」がなくなるのです。落ちているリンゴは静止しているのです。逆に地上に立っている我々は上向きに動いているのです。現に床からおされているではありませんか？とすると当然上に動くはずですね。アインシュタインは、我々が「無重力だと感じる」状態が「静止」している状態だということです。驚いたことに、実験してみると物理法則もそうなっていました。アインシュタインの考え方のほうが真実だったのです。

物が静止している状態にある座標系を慣性系といいます。系とはxyzの座標軸だと思ってください。落ちているリンゴは慣性系に対して静止しています。動いてはいません。我々は地球上でじっとしているようですが、慣性系が次から次へと上から降ってきて、下に落ちていっていて、実は地面から押されてロケットのように上向きに運動しているのです。でもちょうど上向きの加速が、慣性系が落ちていく加速と同じなので、動いていないように見えるのです。一生懸命上昇しようとしているのに、重力と釣り合って上昇できないむなしいロケットのようなものです。

宇宙船も、地球の周りを回っていて動いているように見えますが、実は重力に身を任せた運動をしているので慣性系です。その中は無重力ですね。地上は加速度系で、宇宙船の船内は慣性系。では、何か違いはあるのでしょうか？ 無重力というだけでしょうか？ アインシュタインの一般相対性理論では加速度系では時間がゆっくり進みます。ですから地上の時計は、宇宙船内の時計よりゆっくり進みます。地上で暮らすと宇宙船内で暮らすより一生で1秒の何分の1か長生きできます。でも地上では人間の感じる時間（正確には時計の刻む時間間隔）も遅くなっているのです、2人とも同じ時間がたって死んだと思うでしょう。でも他から見ていると確かに宇宙船内の人のほうが先に死ぬのです。この時間の進み方の差は原子時計で確かめられています。

2. 3 現代の宇宙観

2. 3. 1. 太陽系のでき方

太陽系は内側に水星、金星、地球、火星の小型岩石惑星、外側に木星、土星、天王星、海王星の巨大ガス惑星が存在し、ほとんど同じ平面上を、同じ向きに、ほとんど円軌道で回っています。これは考えてみれば不思議な話です。暗黒星雲で見られるガス円盤からこの惑星系がどのように作られたのでしょうか？

提唱されているモデルの一つに京都モデルというものがあります。微惑星、岩石惑星、ガス惑星の順にできたとするモデルです。図 2.3-1 のように1億年程度の比較的短い時間で惑星系ができるようです。

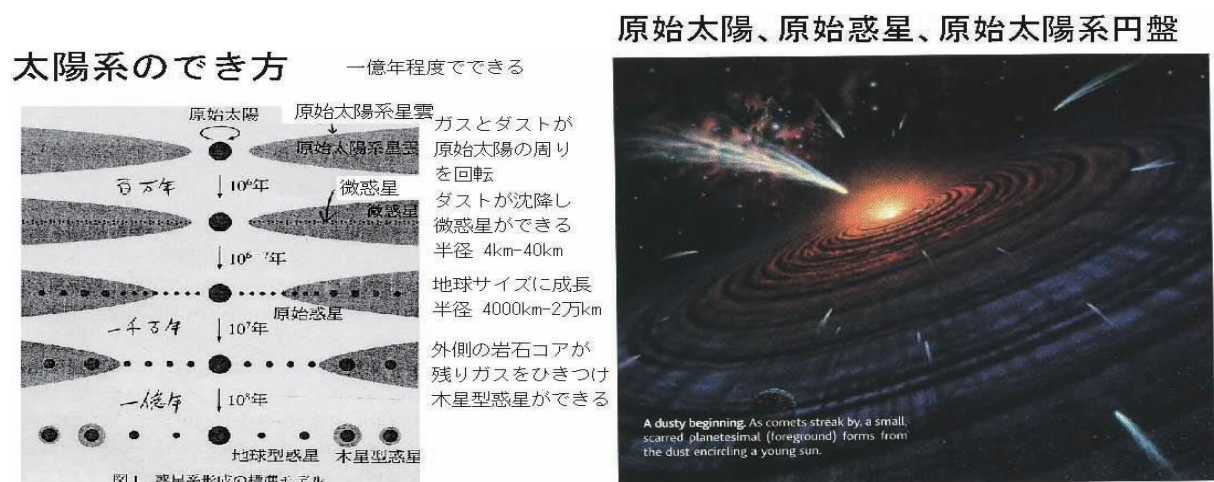


図 2.3-1 太陽系のでき方(左)と創造図(右: Skye & Telescope より)

惑星形成期の衝突の痕跡はいろいろな所に見ることができます。

1. 天王星は「転」王星。(横倒しになって自転している)
2. 金星は逆向きに自転している。
3. 土星の衛星ミマスにはあわや衛星がばらばらになってしまいそうな大クレータがある。
4. 月のクレーターは月形成末期のものが多い。それ以後も形成されてはいるが、少ない。月の海にクレーターが少ないことから分かる。
5. 激しい衝突は月のでき方にも関与しているかもしれません。

2.3.2. 月のでき方（月の起源説）

月はどのようにしてできたのでしょうか？ 古来から諸説が言われてきました。分裂説：地球ができた当初は回転が速く、地球から飛び出した物質が月を作り、跡は太平洋になった。双子説：地球と同じように生まれた。捕獲説：他から飛んできて地球に捕らえられた、などです。しかし月の軌道面は地球の赤道面よりは惑星の公転面に近く（飛び出したのなら赤道上を回るべき）、月には鉄のコアがなく（双子なら同じ成分のはず）、なおかつ酸素の同位対比は地球と似ている（他人にしては酸素が似すぎている）ということを説明できるものがありませんでした。また月には、惑星の大きさに比べて衛星が大きいとか、1個であるとか、昔はもっと近くにあったという他にはない特色もあります。

最近、衝突放出説というのが提唱されています。これによると原始地球もほぼ出来上がった頃のある日、原始地球に火星サイズの原始惑星がオフセット衝突しました。地球のマントルの部分は宇宙空間に弾き飛ばされ、まき散らされた岩石が集まって、ロッシュの限界のすぐ外側に月ができたといえます。

計算機シミュレーションによれば衝突後 2 週間で月は1個のみできるようですが。そんな大衝突があったのかどうかは痕跡が残っていないのでなんとも言えませんが、各種天体の衝突の痕跡をみているとそのような大衝突があったとしても不思議ではないという気がします。

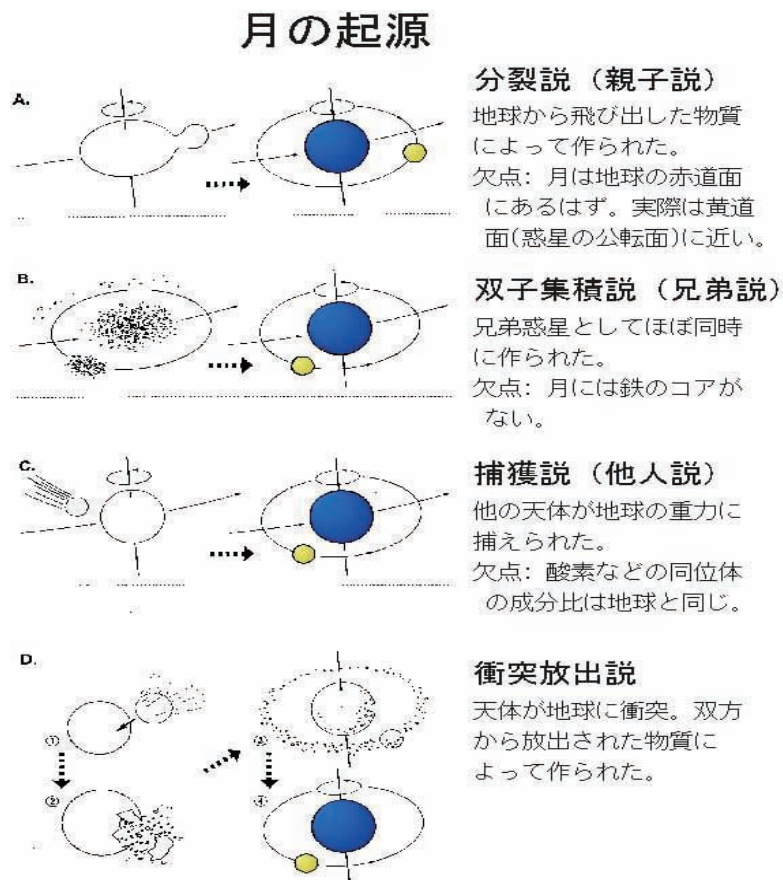


図 2.3-2 月の 4 つの起源説（スペースアトラス P.84 より）

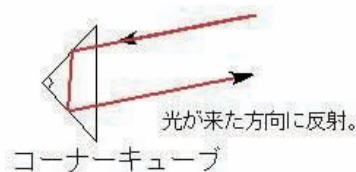
＜遠ざかる月、遅くなる地球の自転＞

アポロが月においてきたコーナーキューブ反射鏡に地上からレーザー光線を当てて帰ってくるまでの時間を測ることで月までの距離をcm単位で測ることができます。10年間測定した結果、月は年間3.8cmずつ遠ざかっていることが分かりました。これには地球の海が一役買っているようです。45億年前月が生まれた当初は、月は地球のすぐそばにあって何と10時間で一周していたことになります。

月が今の1/10の距離にあった頃は、潮汐力は今の10の3乗倍（千倍）でした。（次の潮汐力の項に書いたように潮汐力は距離の3乗分の1で効きます。）つまり現在1m程度の潮の満ち引きの高度差は、1000mでした。富士山の高さの1/4ほどです。1日に2回（当時の1日は10時間程度であったから、5時間毎に）潮が、富士山の1/4までかけあがってきます。地球全体で毎日大洪水だったでしょう。

遠ざかる月、遅くなる地球の自転

アポロが月面に置いてきた
「月レーザー光線反射鏡」



1. 月は年間3.8cmの割合で地球から遠ざかっている。

⇒月が生まれた45億年前には月は地球のすぐ近くにあった。（距離 2万4千km）

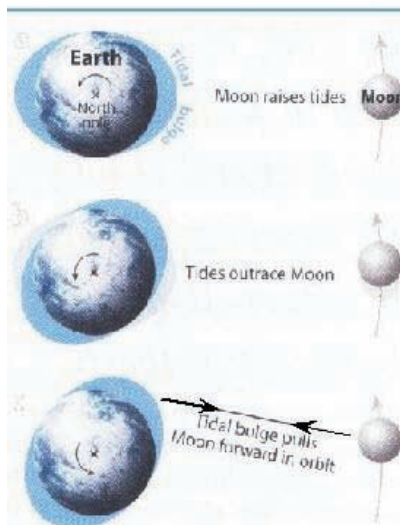
現在 38万km、周期 27.25日。

$T^2/a^3 = \text{一定}$ より

当時 10時間で一周していた。

2. サングの化石から4億年前の1年は約400日だった。

⇒1年の長さは今と同じとすると「1日」は22時間しかなかった。地球の自転は遅くなっている。うるう秒



a. 月の方向の海が盛り上がる（満潮）
（図では太陽の影響は無視してある）

b. 地球の自転のほうが月の公転より速いので、潮は地面に引きずられて月より先に進む。

c. 先に進んだ潮は、月を引っ張り加速する。加速されてエネルギーを得た月は、地球から遠ざかる。

月は、潮を戻そうとする方向に引っ張り、地球の自転を遅くする。

図 2.3-3 遠ざかる月 (Sky & Telescope より)

＜潮汐力＞

大天体の隣に2物体があるとします。2物体は引力でくっついて1天体になろうとします。ところが、大天体の重力は、近い方の天体Aへの方が天体Bへの方より大きいので、2天体を引き離そうとします。これは大天体による重力の差に他ならないのですが、2天体が引き離されるような力が働くように見えます。この見かけの力を潮汐力といいます。大天体を月とします。月の重力により、地球の月側と月の反対側が引き離されるような力が働きます。それが満潮・干潮を作ります。そこでこの力を潮汐力といいます。

2天体の距離の差が同じ1kmのときでも、大天体の中心からの距離が、1000kmと1万kmでは

1000kmの時

$$\text{力の差} = GMm/(1000000)^2 - GMm/(1001000)^2 = 1.997 \times 10^{-15} \times GMm$$

1万kmの時

$$\text{力の差} = GMm/(10000000)^2 - GMm/(10001000)^2 = 1.9997 \times 10^{-18} \times GMm$$

と、3桁も力に差があります。(大天体からの距離 r の3乗で効きます)

このように2天体が大天体の近くにあればあるほど、2天体を引き離そうとする力が大きくなり、ある程度より近くでは、2天体は自分達の重力では合体できなくなる。これをロッシュの限界といいます。この限界線は大天体の半径の2.46倍程度です。

ただし、例えば石自身は、原子の結合で固まりとなっているので、ロッシュの限界は適用できません。宇宙船や人間もそうです。原子の結合は同じ距離の重力よりずっと強いですから、宇宙船が地球の近くを飛んだからといって、バラバラになることはありません。

浜辺の砂や転がっている石など、重力のみで地面に引き付けられているものが、ロッシュの限界の対象となります。もし月が地球のそんなに近くにあったら、月の表面の砂は巻き上げられ、月の裏側の砂も遠くに飛んで行き、宇宙空間に飛散します。地球に立派な輪ができることでしょう。

ただ、大天体がとても重くて小さい場合、例えばブラックホールのような場合、近くに近寄りすぎると潮汐力は、原子の結合力より大きくなることもあります。その場合、宇宙船や人は、上下に引っ張られ、引きちぎられます。ブラックホールの事象の地平に入ってしまうとどうやっても帰ってこれませんが、そうでなくても、近付くと潮汐力でやられるので、あまり近寄らない方がいいですよ。

(例1) 地球表面 ($M = 6.0 \times 10^{24}$ kg, $r = 6400 \times 10^3$ m)の人間。

1m離れて10kgの物体が上下にある場合(頭と足としましょう)。

10kgの2物体の間に働く潮汐力 ΔF は

$$\Delta F = 2GMm/r^3 \times \Delta r$$

$$\begin{aligned}
 &= 2 \times 6.67 \times 10^{-11} \times 6.0 \times 10^{24} \times 10 \times 1\text{m} / (6400 \times 10^3)^3 \\
 &= 3.0 \times 10^{-5} \text{ N} \\
 &= 3.0 \times 10^{-6} \text{ kg 重} \\
 &= 3.0 \text{ mg 重}
 \end{aligned}$$

頭と足が 3 ミリグラム で引かれても痛くもかゆくもありません。

(例 2) 中性子星表面に人が立っている場合はどうでしょう?

($M = 1.4 \times 2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$, $r = 10 \times 10^3 \text{ m}$)

$$\begin{aligned}
 \Delta F &= 2GMm/r^3 \times \Delta r \\
 &= 2 \times 6.67 \times 10^{-11} \times 1.4 \times 2.0 \times 10^{30} \times 10 \times 1\text{m} / (10 \times 10^3)^3 \\
 &= 3.6 \times 10^9 \text{ N} \\
 &= 3.6 \times 10^8 \text{ kg 重} \\
 &= 3.6 \times 10^5 \text{ トン}
 \end{aligned}$$

36 万トンの力で引かれたら、、、考えたくないです。

(例 3) 中性子星から 1000km 離れたところにいるとどうでしょう?

($M = 1.4 \times 2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$, $r = 1000 \times 10^3 \text{ m}$)

$$\begin{aligned}
 \Delta F &= 2GMm/r^3 \times \Delta r \\
 &= 2 \times 6.67 \times 10^{-11} \times 1.4 \times 2.0 \times 10^{30} \times 10 \times 1\text{m} / (1000 \times 10^3)^3 \\
 &= 3.6 \times 10^3 \text{ N} \\
 &= 3.6 \times 10^2 \text{ kg 重} \\
 &= 360 \text{ kg 重}
 \end{aligned}$$

これでもちょっと厳しいかも。

木星のガリレオ衛星で一番内側にあるイオでは、火山活動が観測されています。月程度の小さな衛星では内部は冷え切っていると思われていて、イオの内部がまだ熱いことは不思議です。イオは木星からの強大な潮汐力を受け、岩石が「潮の満ち引き」を起こしその摩擦熱で内部が温まっていると理解されています。

2. 3. 3. 宇宙の広がり

天体写真が 1860 年ごろ発明され、目に見えないような天体も誰にでも「見える」ようになってきました。人間の目は肉眼では 6 等星までしか見えません。これは 1 秒間に 1 万個の光子が目に入ってくるような明るさです。また目は動画を受けようになっているので残像(1 秒程度)より前の画像はなくなってしまう。望遠鏡では一度に一人しか見れないので、ある人が見たものを他人が確認することはできません。スケッチで明るさや形などを記録

するとしてもその人の主観が入ってしまいます。それが写真であれば、1秒間に1個しかこないような弱い光でも、1分間でも1時間でも同じフィルムの上に露光することで「見る」ことができます。あとで何回でも繰り返し見ることができますし、他の人も見ることができます。顕微鏡を使って正確に位置を求めたりじっくり明るさを測ったりもできます。1年前の写真を取り出して比較することもできます。肉眼から写真に変わったことは、感度が上がっただけでなく、客観性や定量性が向上するという本質的な変化だったのです。その後1900年代の終わりには写真フィルムは CCD 検出器（デジタルカメラにはいるのと同じタイプの画像検出器）にとってかわられ、観測感度はさらに飛躍的に向上しました（図 2.3-4）。

大きな望遠鏡も作られるようになってきました。1862 年には新造の 43cm 屈折望遠鏡で白色矮星であるシリウスの伴星も発見されました。一方でフラウンホーファーなどによるスペクトルの研究も進みました。

現代の宇宙観にがらりと変わったのは 1929 年にハッブルの法則が発見されてからといってよいでしょう。無限の過去から無限の未来まで恒久不変に存在する宇宙から、137億年前に大爆発で始まった宇宙に変わったのですから。



図 2.3-4 ハッブル宇宙望遠鏡による Arp188 (UGC10214)の写真

4 億 2 千万光年かなたの銀河。ハッブル宇宙望遠鏡の CCD カメラで撮像。2002 年 3 月に
取り替えた新型カメラによる画像。

（ハッブル宇宙望遠鏡； <http://hubblesite.org>）

2. 3. 3. 1 渦巻星雲は銀河星雲か島宇宙か

大望遠鏡と写真技術が発達すると、数多くの渦巻星雲が見えてきました。星雲星団のリストとしては、1771 年にメシエが彗星と紛らわしい星雲星団をリストアップしたメシエカタログが有名です。それには 108 個の星雲星団が載っています。その中には今でいう、超新星残骸(1 個)、散光星雲、散開星団、球状星団、銀河(38 個)がごちゃまぜで入っていました。ところが写真ができると星雲星団の数が一気に増え、1888 年に作られた NGC カタログには 7840 個もの星雲星団、1895 年の IC カタログにはさらに 5386 個もが載っています。これらにリストされているのは大多数が銀河です。当時は渦巻き型の星雲ということで渦巻星雲と呼ばれました。この渦巻星雲はどこにあるのだろうかというのが 1920 年のシャプレーとカーチスの大論争でした。シャプレーは、渦巻星雲は球状星団と同じく銀河系内の星雲であると主張しました。カーチスは、渦巻星雲は銀河系の外にありわれわれの銀河系と同じような銀河(恒星の集まり)であると主張しました。この論争に決着をつけたのが渦巻星雲に現れた新星でした。この新星はわれわれの銀河系内のものに比べて1万分の1の明るさしかありませんでした。もともとの明るさが同じとすると 100 倍距離が遠いということです。そうするとわれわれの銀河系の外側の天体であるということになります。こうして渦巻星雲は銀河であるということになりました。もっともその時、渦巻星雲に現れた新星は、今で言う超新星でした。よって本当の距離はもっと遠かったのです。

中世、彗星は地球大気内の現象か天体現象かで論争になりました。今ではハレー彗星と呼ばれている彗星が 76 年ごとに現れていることをハレーが発見し次の回帰を预言したのは 1705 年でした。1920 年、今度はアンドロメダ銀河のような「渦巻星雲」は我々の銀河系内の現象か、銀河系外の現象かで論争になりました(参考:図 2.3-5)。その論争を最終的に決着させたのは、ハッブルによるアンドロメダ銀河中のセファイド変光星の観測でした。



図 2.3-5 アンドロメダ銀河と池谷—張彗星 池谷—張彗星とアンドロメダ銀河(M31) 2002.4.5. Casado 氏 (スペイン)撮影。この時、池谷—張彗星は地球から 8 千万 km (4 光分)。アンドロメダ銀河は 250 万光年です。

2. 3. 3. 2 距離を教えるセファイド変光星

1908 年セファイド変光星というもので距離が測れることが発見されました。この変光星は星自身の大きさが変わって明るさを変えるタイプの変光星です。この種の変光星には何種類かありますが、直線的に速く立ち上がって直線的にゆっくり落ちるという光度曲線で他と区別できます。ケフェウス座デルタ星に代表されるのでセファイド変光星と呼ばれます。ケフェウスとセファイドでは全然違うじゃないかと思われるかもしれませんが、ギリシャ語読みと英語読みだけで元は同じつづりなので、気にしないでください。セファイド変光星は「明るい星ほど周期がゆっくりになる」という性質があります。この性質を使うと変光の周期さえ測れば本当の明るさが分かるのです。本当の明るさと見かけの明るさを比較することでこの星がどのくらい遠いのか分かります。そもそもセファイド変光星は太陽の約 1000 倍も明るいので遠くからでもよく見えます。当時最大のウィルソン山の 1.5m 望遠鏡を使って、ハッブルはアンドロメダ銀河の写真を撮りました。ガリレオ・ガリレイが望遠鏡を使って天の川は暗い星の集まりであることを発見したように、大望遠鏡で写真を撮るとアンドロメダ銀河も暗い星の集まりであることがわかります。あんまり暗い星は星雲と区別が付きませんが、明るい星は1個1個分解することができます。ハッブルは何十枚もの写真を比べて何個かセファイド変光星を見つけ、周期を測りました。そうしてアンドロメダ銀河は銀河系の外側にあることが明らかになりました。こうしてアンドロメダ大星雲はアンドロメダ銀河と呼ぶようになりました。ハッブルの値は不正確でしたが、同じ方法により今ではアンドロメダ銀河の距離は 250 万光年だと求められています。

ハッブルの名前を採ったハッブル宇宙望遠鏡の目的の1つは、遠くの銀河のセファイド変光星を探し、その銀河までの距離を測ることです。こうして今では距離1億光年まで代表的な 28 個の銀河の距離が求められています。宇宙の果てまでの距離の1%くらいまでセファイド変光星の方法で測られているわけです。

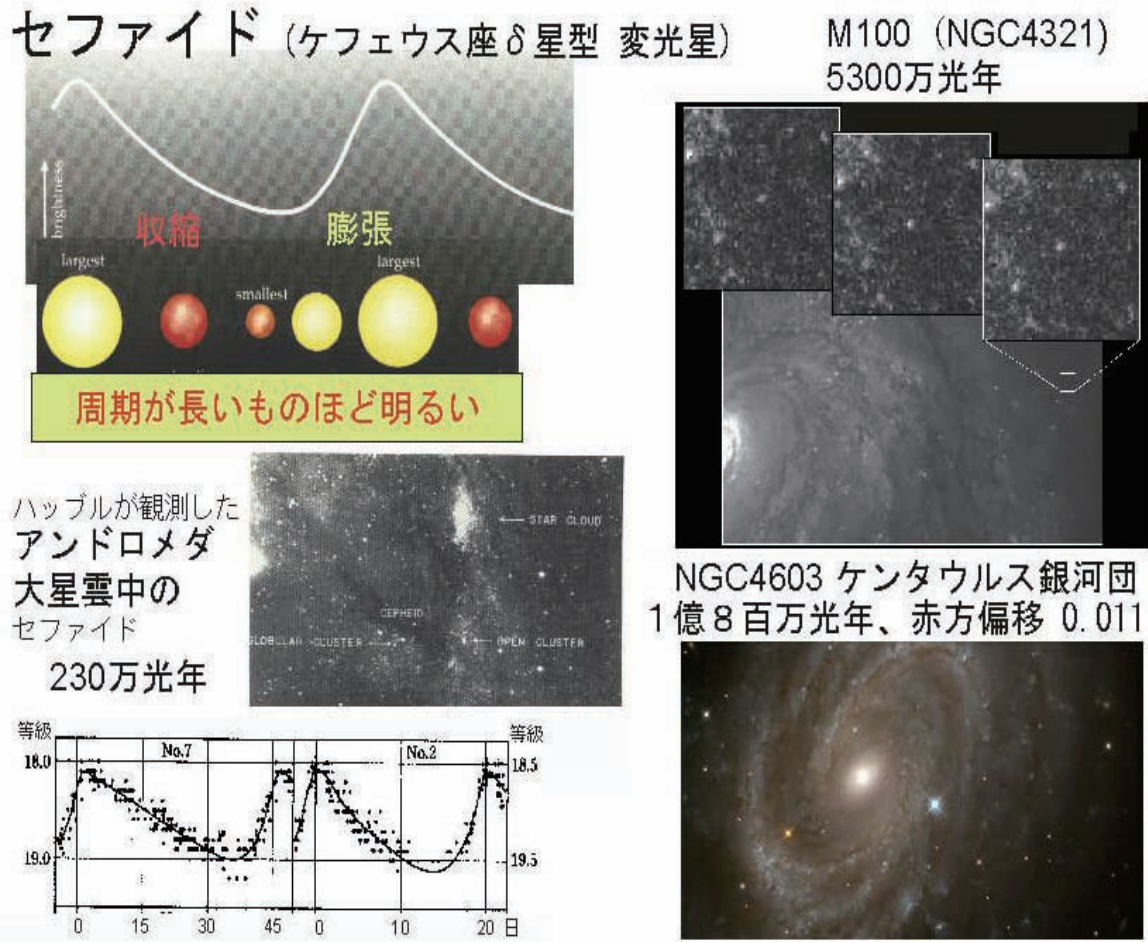


図 2.3-6 距離を教えるセファイド変光星

(左: Sky & Telescope 右: <http://hubblesite.org>)

2. 3. 3. 3 オルバースのパラドックス

1800年頃オルバースが広めたというオルバースのパラドックスというのがあります。夜はなぜ暗いかという当たり前のような疑問ですが、深い意味を含んでいます。

(仮定) 恒星は均等に無限遠まで分布している

(結論) 夜空は明るい。

夜空のどっちの方向を見ても必ずどこかの星の表面にぶちあたるはずです。どこを見ても恒星の表面である、つまり地球は恒星の表面に取り囲まれているわけで、夜空は太陽に照らされた昼間と同じように明るいはずです。6000 度の恒星表面に覆われているので、地球の温度も 6000 度になるはずです。

でも実際は夜空は暗いし地表の温度は低いですから、仮定のどこかが間違っているの

です。オルバース自身も答えはわかりませんでした。この問いにハッブルが答えを出すことになります。

「宇宙は均等か？」

恒星は銀河のなかにだけ存在し、銀河の外にはほとんどありません。決して均等ではないのです。では銀河は均等かというところではなく、銀河も銀河団をなし、銀河のないボイドというところもあります。決して均等ではありません。銀河団も均等には分布せず、グレートウォールのような大規模構造を作っています。ここまでで宇宙の地平までの1%程度まで見えています。では宇宙は一様はないのでしょうか？ しかし、もっと大きなスケールで見ると一様であろうとみんな思っています。現在、SDSS(スローン・デジタル・スカイ・サーベイ; 本書2.4.1.6 節)が観測中ですので10年以内に答えは出るでしょう。

「無限遠まで」

ハッブルの法則を信じると、これ以上は見えない距離「宇宙の地平」があります。オルバースのパラドックスは、「無限遠まで見えるわけではないから」が答えです。現に図2.3-4のArp188の写真などは宇宙の地平までの半分くらいは写っていますが、まだ銀河がない黒い場所があります。また仮に銀河で覆われていたとしても、銀河の中の星と星の間はすかすかですから、夜空は決して星の表面で覆われてはいないのです。そのことは手前の銀河の向こうに遠くの銀河が透けて見えていることでも分かるでしょう。

2. 3. 3. 4 ハッブルの法則

ハッブルは銀河の写真を撮っただけでなく、銀河のスペクトルも撮りました。太陽光をプリズムで7色に分解した経験はみなさんお持ちでしょう。あれと同じことを銀河に対して行いました。7色の写真を撮ることを、スペクトルを撮るといいます。銀河も太陽みたいな恒星の集まりですから似たようなスペクトルが得られます。ただとっても暗いので長時間の露出が必要です。太陽のスペクトルの中にはカルシウムなどの吸収線が一杯見られることは1815年のフ라운ホーファーの研究から分かっていました。銀河のスペクトル中にも同様の吸収線が見られます。これから何がわかるのでしょうか？ 銀河全体が動く速さもその1つです。ドップラー効果により銀河がこっちに近づいていると吸収線の位置が青いほうにずれます(青方偏移)。遠ざかっていると赤いほうにずれます(赤方偏移)。赤方偏移 z は波長のずれ量 $\Delta\lambda$ とともとの波長 λ を使って $z = \Delta\lambda / \lambda$ と表されます。遠ざかるスピード v との関係は、

$$1+z = \sqrt{(1+v/c)/(1-v/c)}$$

です。ずれる量が大きいほど速いスピードだということです。

$v=0$ では $z=0$ です。 v が光速に比べ小さいときは、 $z=v/c$ です。 v が光速に近づくと z はいくらでも大きくなります。

まず、アンドロメダ銀河は青いほうにずれていました。毎秒 120km で近づいてきていたのです。他の銀河も測りました。1914 年、合計 13 個の銀河を測り終えた段階では 11 個が赤方偏移でした。もしランダムに動いているなら青方偏移、赤方偏移が半々のはずです。1925 年には 45 個の銀河を測り、実に 43 個が赤方偏移でした。

1929 年にはセファイド変光星の方法で距離のわかった 19 銀河について距離と赤方偏移量の関係を書いてみました。すると遠い銀河ほど速いスピードで遠ざかっていた。ハッブルは散らばるデータの真ん中へんに直線を引き $v = H_0 d$ と書きました(図 2.3-7)。遠ざかる速度 v は銀河までの距離 d に比例しているという意味です。これがハッブルの法則です。 H_0 は比例定数でハッブル定数と呼ばれます。遠いものでは遠ざかる速さは毎秒 1000km にも達していました。渦巻銀河の回転速度は、例えば太陽が銀河系の中心の周りを回る速さは毎秒 220km ですから、その5倍も速い速度で、銀河ごとふっとんでいたのです。その後観測が進み、ハッブルの法則はもっと遠いものまでなりたっていることが確かめられました。1935 年には 150 個の銀河で測定され最も速いのは秒速 4 万 km、1950 年代には秒速 10 万 km の銀河も見つかりました。こうなると超新星爆発の 10 倍のスピード、光速の 1/3 です。こんな速さで銀河全体が動いているのは尋常ではありません。いまでは光速の 99% の速さで遠ざかる銀河も発見されています。

ハッブル定数はその後いろんな方法で求められ、現在では $72 \pm 12 \text{ km/s/Mpc}$ となっています。この見慣れない単位は 1Mpc つまり 326 万光年離れるごとに 72km/s ずつスピードが速くなるという意味です。

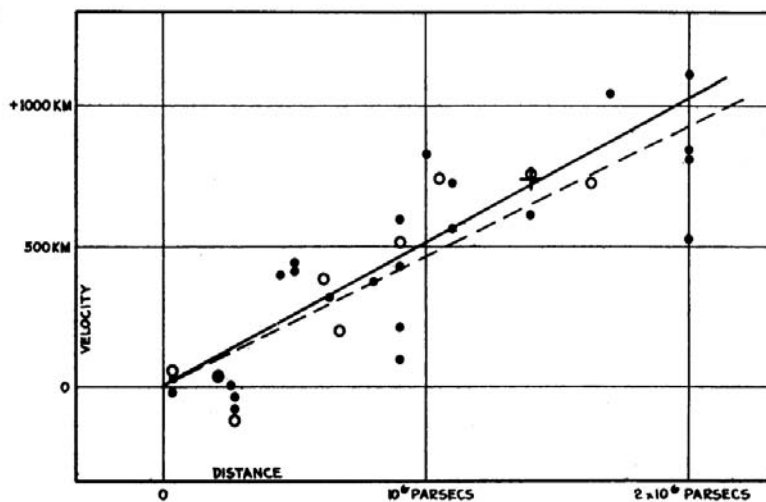


FIGURE 1
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

図 2.3-7 ハッブルが1929年の論文に掲載した距離(横軸)と後退速度(縦軸)の関係。1929年当時、遠く天体までの距離推定に間違いがあったため $H_0 = 500 \text{ km/s/Mpc}$ という間違ったハッブル定数値を導いたが、距離と速度が比例するという法則の発見は正しかった。(ハッブルの論文 <http://www.pnas.org/cgi/reprint/15/3/168>)

2. 3. 3. 5 ハッブルの法則の意味

ハッブルの法則がどこまでも正しいとするとどういう意味があるのでしょうか？

<宇宙の果て>

どんどん遠くに行くとどんどん銀河の速さが速くなります。あるところまで行くと光速を超えてしまいます。光速を超えたところからは永遠に光は届きません。ここまでしか見えないので、そこを宇宙の地平と呼びます。それは、ざっと $30 \text{ 万 km/s} \div 72 \text{ km/s} \times 326 \text{ 万光年} = 135 \text{ 億光年}$ です。

特殊相対論では光速を超えて加速することはできません。地平線の向こうにある銀河は我々から光速を超えるスピードで遠ざかっていることにはなりますが、いいのでしょうか？ いいのです。一般相対論では1つ抜け道があります。重力です。重力に身を任せている時その物体は静止していると見なされる話は16ページでしました。重力は引力ですが、その昔、重力のような斥力が働き、銀河を加速したことにすればいいのです。遠ざかっているのは「銀河を中に含む空間」であって、銀河自身ではありません。銀河はその空間の中で静止している（重力に身を任せて運動している。自由落下している）のです。空間同士のスピードは中に存在する銀河が知らないうちに光速を超えてもいいのです。

他にも空間の移動速度が光速を超えている所があります。ブラックホールの因果の地平の内側です。自由落下で落ちて行った宇宙船は超光速で落ちています。これも落ちているのは「宇宙船を含む空間」であって、宇宙船はあくまで自由落下すなわちその空間に静止しています。だからいいのです。落下する空間の速度が光速になるところが事象の地平です。そこを越えるとその宇宙船から出た光は永遠に我々には届きません。

2. 3. 3. 6 ビッグバン

みんな遠ざかっているということは、昔はみんなもっと近かったということです。今 326 万光年のところにある銀河は、 $326 \text{ 万光年} \div 72 \text{ km/s} = 150 \text{ 億年前}$ には「ここ」にありました。今 326 万光年の2倍のところにある銀河は、距離は2倍ですが遠ざかる速さも2倍なので、結局、同じく150 億年前には「ここ」にありました。つまり150 億年前にはすべての銀河が「ここ」にあったということです。すべての銀河は 150 億年前に一点から広がりました。この大爆発をビッグバンと呼んでいます。

「ここ」はどこでしょうか？ 地球を中心に爆発したのでしょうか？ いや。我々は、宇宙原理といって、宇宙はどこでも同じようであるということを仮定します。我々から見れば我々中心に遠ざかっているように見えるが、アンドロメダ銀河から見ればアンドロメダ銀河を中心にすべての銀河が遠ざかっているように見えるだろうと考えます。宇宙の地平にある銀河から見れば、我々が反対向きに光速で遠ざかっているのです。さらにその向こう側にも銀

河が綿々と連なっていて、やはり光速で遠ざかっているものもあるでしょう。その銀河は我々から見ると光速の2倍で遠ざかっているわけです。もちろんその銀河は我々からは見えません。

銀河が何かの爆発で吹き飛んでいると考えるには、遠くに行くほど運動エネルギーが大きくなるし、もともと超光速なんて作れません。加速していった光速に近づくと質量が増えるので加速しにくくなり、決して光速を超えることはできないのです。そこで重力に身を任せている「空間」を考えます。銀河はその空間に静止していて、空間が重力(みたいな反発力)で遠ざかったと考えます。これなら超光速運動も可能です。風船の上に書かれたたくさんの印が銀河とすると、風船が膨らむと距離に比例して互いに遠ざかるでしょう。ぶどうパンをたとえに用いる人もいます。ぶどうが銀河です。パンを焼いてパンが膨らむと、ぶどうとぶどうの距離は互いの距離に比例して広がっていきます。それらには膨張の中心はありません。しいていえばどの点もが中心です。

というわけで、宇宙膨張の場合も中心は、すべての場所であり、どこでもいいのです。地球でもアンドロメダ銀河でも、超遠方の銀河でも。全ての地点は対等で、全ての地点が「ここ」にありました。そもそも銀河を中に含んでいる空間が全て 150 億年前に一点から広がりました。この大爆発をビッグバンと呼んでいます。

(注意) 遠くつまり昔は、ハッブル定数は今とは違っていた(多分大きかった)ので、上の計算は厳密には正しくないです(だいたいは正しいですが)。

2. 3. 3. 7 ビッグバン宇宙

ビッグバン理論の宇宙モデルでは、原初、宇宙は熱い巨大な火の玉のようなものでした。火の玉は爆発し、水素とヘリウムが作られます。水素とヘリウムのガス雲は重力で縮まり星となり、その中でさらに重い元素ができ、それらの元素から、人間を含むさまざまな物質が作られ、ついに今みるこの「世界」が出現したと考えられています。

熱い宇宙の名残りは、3K のマイクロ波背景放射として観測されています。全ての始めの大爆発から今に至るまで、宇宙は爆発による膨張を続けています。それは銀河のスペクトルの赤方偏移から知ることができます。それは銀河が遠ざかっていることから生じるドップラー効果です。

ビッグバン宇宙論を支える3証拠は、

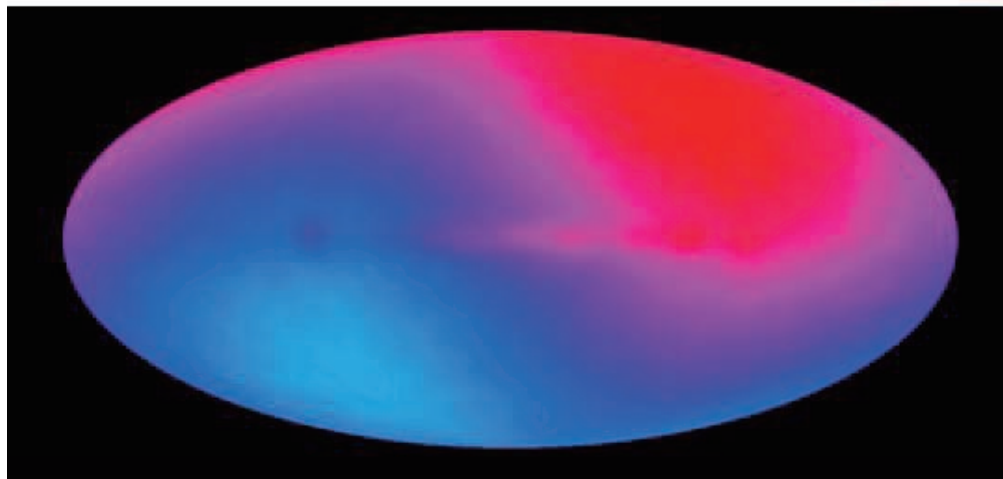
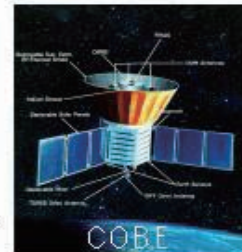
1. ハッブルの法則
2. 3K マイクロ波背景放射
3. どの星でもヘリウムが全体の 25%程度であることです。

＜3Kマイクロ波背景放射＞

1965年ペンジアスとウィルソンは偶然、全天から一様に来る電波を発見しました。この電波は手前の星や銀河から来ているのではなくその背後から来ていました。ちょうど絶対温度で3度の物体が放射する電波でした。1989年COBEという人工衛星は、3Kマイクロ波背景放射を精密に調べました(図 2.3-8)。その結果は想像以上に理論に合ったもので、放射スペクトルはぴったり 2.728K に合致し、3.353mK の太陽系の運動が見え、 $18\mu\text{K}$ のムラムラが発見されました。これは宇宙ができて 30 万年後の姿です。

宇宙背景マイクロ波放射

2.728Kを均等に差し引いたもの
3.353mKの太陽の運動と銀河面成分が見える。



太陽の運動と銀河面成分を取り除いたもの。
 $18\mu\text{K}$ のゆらぎが見える。これが銀河に成長した。

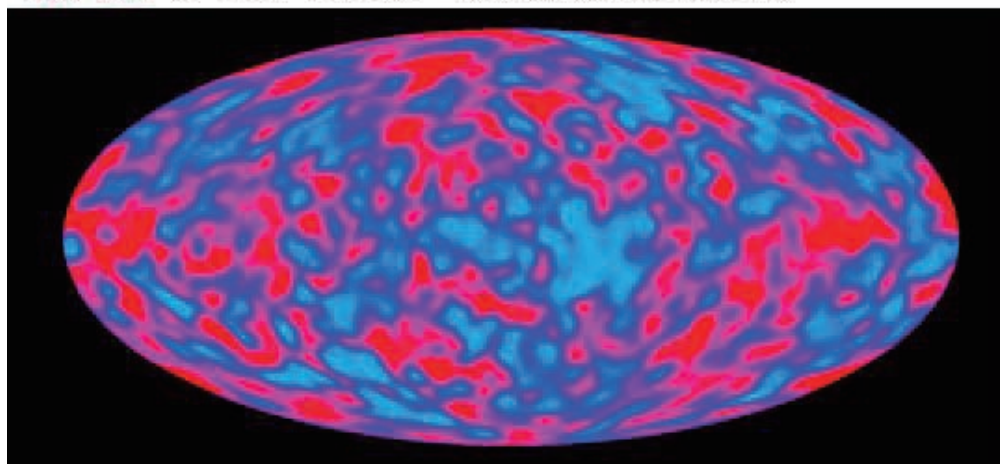


図 2.3-8 宇宙背景マイクロ波放射
(Physics Today, June 1992 の表紙から)

＜銀河の進化と宇宙の大規模構造＞

このムラムラのガスが収縮し星が生まれ銀河ができました(図 2.3-9)。その小さな銀河が合体し、20 億年後には現在ハッブル望遠鏡で見える最遠方の銀河にまで大きくなりました。

ただ3Kマイクロ波のわずかなゆらぎからだけでは銀河にまで成長できません。ムラムラが濃くなっているところにはダークマターがもっと濃く集まっていて、それに引き寄せられて銀河が生まれたようです。

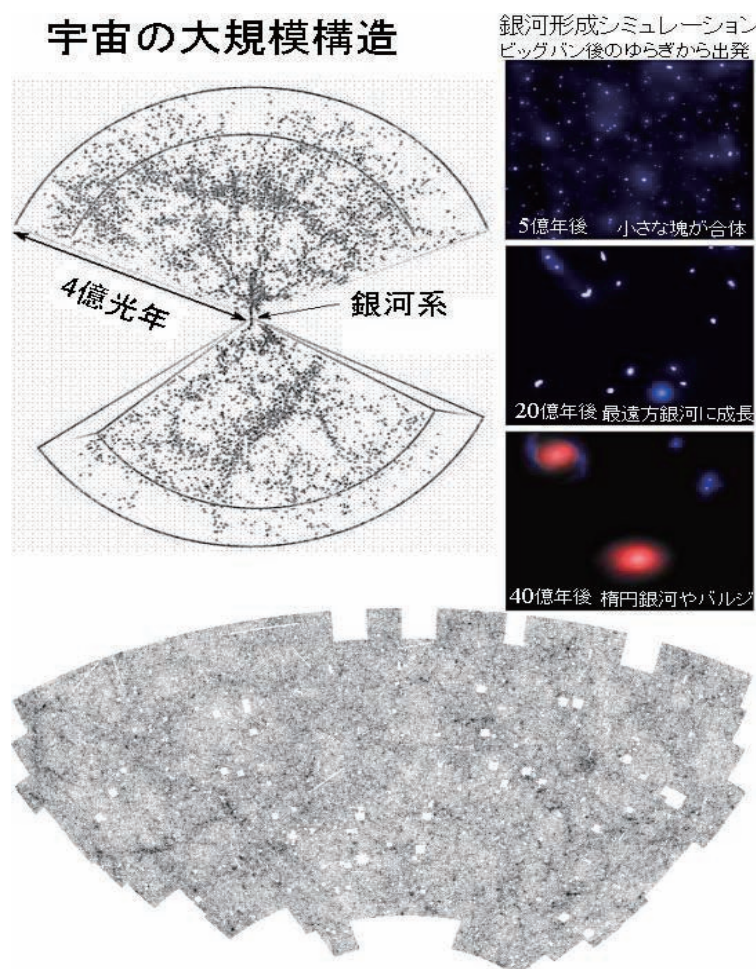


図 2.3-9 宇宙の大規模構造

(San Pascaville, Arizona State University 等)

＜ビッグバン理論の問題点＞

○地平線の問題

マイクロ波の宇宙背景放射は、どの方向からでも 2.73K で一様にやってきます。しかし考えてみればこれは不思議です。ある方向から来た電波は、140 億年旅して今やっと地球に達しました。それと正反対の方向から来た電波もやはり、140 億年旅して今やっと地球に達しました。この2つの電波は今初めてここで出会ったのに、なぜ同じ温度なのでしょう。

同じ温度というのは、互いに行き来して熱が高いほうから低いほうに流れて等しい温度になるのです。最初から偶然同じ温度になるというのは考えにくいのです。

インフレーション理論によれば、この2点はインフレーション前にはとても近くにあり相互作用しあって等温になっていました。それがインフレーションの急激な膨張で引き離され、今やっと再び巡り合えたのです。だから等温なのだと説明されます。

○平坦性の問題

宇宙は閉じているか開いているかは決着がついていませんが、閉じるか開くかの境目に近いことは間違いありません。この宇宙はビッグバンから 150 億年もたっているにもかかわらず、今だにほぼ臨界密度で膨張しているのです。臨界密度を1とすると、現在臨界密度からのずれは大雑把に言って 0.1 くらいです。これからさかのぼると、宇宙が生まれたプランク時間の時には、宇宙の密度は 10 の 60 乗分の 1（つまり 10^{-60} ）の精度で1だったことになります。もしこれより大きければ、とっくの昔に宇宙は収縮に転じ、消滅しまっていることでしょう。あるいは 10 の 60 乗分の 1 でも小さければ、膨張しすぎてスカスカになって銀河など生成しなかったでしょう。すなわち宇宙が誕生したときには、宇宙はほとんど臨界密度であったということが言えます。これは偶然なのでしょうか？

インフレーション理論によればこれは偶然ではありません。最初は多少ずれていた密度も急激な膨張により引き伸ばされ、臨界密度に限りなく近くなったと説明されます。

○反物質の問題

我々の身の回りにあるものは全て正物質です。ところが高エネルギーの光から陽子などの物質が生成される時には、通常の陽子のような正物質と、反陽子のような反物質が必ず対(つい)になって生まれます。ビッグバン初期においてもそうやって正物質が出来たのであれば、もう半分の反物質はどこに行ったのでしょうか？ 反物質の星や銀河も光では同じように見えるので区別はつきませんが、もし正物質と出会うと双方消滅し激しい爆発を起こすはずですが、でも、宇宙の果てまでの90%までを見渡せるようになった現在でもどこを見渡してもどこにもそのような場所はありません。

ここで(未完成の物理学の力の)大統一理論によれば、X 粒子なるものが存在し、X 粒子と反 X 粒子は等量生じたけれども、崩壊後は粒子の方がちょっとだけ反粒子よりも多かったとされます。その差は 10 億個に1個程度の割合です。宇宙が出来て 10^{-32} 秒の頃の話です。もちろんこんな高エネルギーの粒子を地上の加速器で作り出すことは未来永劫できません。こうして大統一理論は反物質問題は解決しますが、モノポール問題というのを引き起こします。

○モノポールの問題

モノポールは磁石の N 極のみあるいは S 極のみの粒子で、未だ発見されていません。大統一理論によると真空の相転移の際、大量のモノポールが発生します。その数は非常に大量で、モノポールだけですぐに宇宙は収縮してしまうほどです。

インフレーションがあったとしたら、大量のモノポールが生じても宇宙が急激に膨張したた

めにその密度が十分薄まってしまい、現在の宇宙の地平線までの中には数個しかないことになります。そうなると宇宙が収縮しなくても、またこの宇宙にモノポールが検出されなくてもいいことになります。

<インフレーション理論>

このようにインフレーションはビッグバン理論の問題点を解決します。

インフレーション理論とはビッグバン以前、宇宙がまだ原子核よりはるかに小さかったころ急膨張が起こり一挙にマクロな大きさになったという説です。宇宙ができて 10^{-37} 秒後から 10^{-34} 秒後の間に、通常なら 10^{-29} cm から 10^{-26} cm にしか膨張できない宇宙が、 10^{-29} m から 1 cm とも 1 km ともいう程度の大きさまで膨張しました。この急膨張のエネルギーは「真空」の状態が変化したことによる潜熱の解放だとされます。急激な膨張が終わったあと、解放された真空のエネルギーは素粒子を産み、またその素粒子の運動エネルギー（熱エネルギー）に変わります。この熱い素粒子のスープからビッグバンの火の玉宇宙が始まったのです。

では、インフレーション理論の光速を越える急激な膨張はどのように起こったのでしょうか？ それは反重力とでも呼ぶようなものによります。重力のみが空間を加速したり減速したりできます。「反発する重力」のようなものを導入すると互いに離れる方向に光速を超えるような加速も可能です。銀河はお互いに遠ざかって行きますが、その場合でも銀河はあくまで各々の空間に「静止」しているのです。銀河の運動エネルギーはゼロのままです。

インフレーションのエネルギー源は、真空のエネルギーだと言われています。真空は何もない状態ではなく、常に粒子-反粒子対(ついで)が生成しては消滅している状態です。つまりわずかですがある程度のエネルギーを持っています。このエネルギー状態があるとき変化すれば、その変化分は目に見えるエネルギーとなって現れます。そのエネルギーが「反重力」を生み出したようです。

インフレーション理論が本当だとすると、この宇宙の大きさは現在の宇宙の地平線までの 10^{30} 倍も大きいことになります¹。体積で言うと 10^{100} 倍程度になるのでしょうか。現在の宇宙の地平線までにある銀河の数は 1000 億個といわれます。これは 10^{11} 個に過ぎません。地平線の向こうにはその 10^{100} 倍も多くの銀河があるのです。我々が見ている宇宙は、本当の宇宙のほんの一部かもしれません。

(¹この数字は大いに不定性があり、定まったものではありません。ただ1よりは非常に大きいものです。)

2. 3. 4 恒星の一生、いろいろな天体

恒星は暗黒星雲の中で生まれます。暗黒星雲としては馬頭星雲が有名です(図 2.3-10)。電波観測により一酸化炭素などの分子が存在することが分かっているので、分子雲とも呼ばれます。分子も存在できるような密度が濃く温度が低い(30K 程度)領域です。「雲」とい

っても最初はその密度は1立方センチあたり水素原子1000個と物理の実験室で普通に作られる真空(1立方センチあたり10億個)と比べるとはるかに希薄です。ただそれが何光年にもわたって続いているために光が通り抜けられなくなります。背後に星の光があればそれをバックに黒く浮かび上がるわけです。背後に光がなければ闇夜のカラスで見えませんが、電波では光る分子雲として観測されます。



図 2.3-10 暗黒星雲として有名な馬頭星雲 (Structure-in-Space, VTL)

暗黒星雲の中でちょっと周りよりガスが濃いところがあると自分の重力で収縮します。収縮すると重力はさらに強くなり(重力は距離の2乗に反比例することを思い出してください)さらに収縮が進みます。こうしてガスは中心に落下していき、摩擦熱で熱くなり、赤外線や可視光で輝くようになります。この状態の星を原始星といって、重力エネルギーで光っている星です。原始星の状態は1千万年くらい続きます。

大質量星の場合、途中、ハービックハロー天体(ジェットを噴出している原始星)のような状態を経験することもあります(図 2.3-11)。



図 2.3-11 星生成領域とハービックハロー天体 (<http://hubblesite.org>)

中心の温度が1千万度になると水素の核融合が始まります。そうして星は安定して輝くようになります。ふつう星はこうして水素の核融合で輝いている星です。重い星は短命、軽い星は長生きです。星は、太く短く、細く長く生きます。これは核融合反応が温度に非常に敏感なためです。太陽では100億年輝きます。太陽の10倍の重さの星では1億年、太陽の1/10の星では10兆年輝きます。

太陽はすべての燃料を使うと1000億年輝く計算になります。しかし太陽は1/10使用した時点で一生を終わります。それはこういう事情です。中心に水素の「燃えカス」であるヘリウムが1/10ほどたまると水素とヘリウムとの境界で燃えている水素の核反応が不安定になり、星の外層がどんどん膨張してしまいます。その結果、星は大きく広がり(地球軌道くらいまで膨らむ)、表面温度は下がり、「赤色巨星」となります。さらに外層は流出が続き、ついには、中心にヘリウムの芯、外側に広がったガス(惑星状星雲)という状態になります(図 2.3-12)。外層のまだ燃えていない層は宇宙空間に広がってしまい、これでこの恒星の一生は終わりです。あとには白色矮星と惑星状星雲が残ります。惑星状星雲は、10万年で飛散してしまい、姿を消します。白色矮星は100億年もすると冷えて黒色矮星になります。これが太陽の質量の8倍以下の星の一生です。



図 2.3-12 惑星状星雲 (<http://hubblesite.org>)

質量が太陽の8倍から30倍の星では、赤色巨星となるまでは同じですが、重いため中心の温度が上がり、ヘリウムも核融合を始め炭素や酸素に変わります。そしてさらに炭素や酸素も核融合を始めます。重力が強いため炭素や酸素も安定して燃えます。そして最終

的に鉄が生成されます。鉄はそれ以上核融合できません。しかし重力により鉄の芯は収縮し温度が上がります。そして 50 億度になった時点で鉄は熱を吸収しヘリウムに分解してしまいます。これまでヘリウムから鉄に至るまで核融合で出てきた熱をこの期に及んで一気に吸収する訳です。すると星は支えを失い、中心に向かって落下していきます。あるところまで中心が圧縮されると芯は中性子星というものになります。中性子星はとても硬いのでそれ以上は圧縮されません。それにもかかわらず物質は落ちてきます。物質は中性子星にあたり、跳ね返ります。そうして星全体が吹き飛びます。それがⅡ型超新星です。歴史的には突如星が現れるので新星と呼ばれました。そのうち特に明るいのが超新星です。しかし実際は恒星の最後の大爆発でした。吹き飛ばされた物質は超新星残骸となります。それも10万年程度の寿命で飛散してしまいます。爆発のメカニズムにはもう1説あります。鉄が分解するときに大量のニュートリノを出します。爆発のエネルギーの実に99%はニュートリノで出てきます。その一部が星の外層に吸収されて、そのエネルギーで爆発するということです。どちらが本当かはまだ決着がついていません。とにかく、中心に中性子星、周りに超新星残骸が残ります。

質量が30倍以上の星では、赤色巨星になり、鉄の分解で星が崩壊するところまでは同じです。しかし中心にできる中性子星はこの星を支えることはできず、つぶされてブラックホールになってしまいます。外層は、吹き飛んで超新星残骸になると考えられています。しかしひょっとしてすべてブラックホールに落ち込んでしまい、超新星爆発はしないのかもしれませんが。とにかく、中心にブラックホール、周りに超新星残骸が残るとしておきましょう。

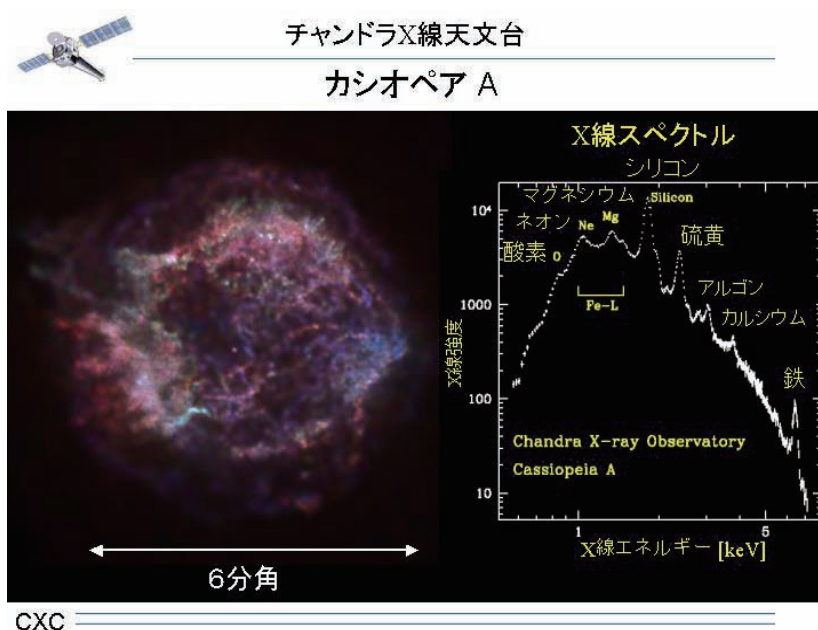


図 2.3-13 X線でみた超新星残骸(天文衛星チャンドラのデータ、Chandra 衛星のHPから)

こうして、原始星、恒星、赤色巨星、白色矮星、中性子星、ブラックホールが登場しました。これらの星々は、次のようにとらえることができます。

星の一生は「重力との闘い」です。ニュートンの重力の式 $F=GMm/r^2$ を見ればわかりますが、 r が小さければ F は非常に大きくなります。2つの物体があるとしましょう。

1. 2つの物体の間に重力が働く。
2. 2つの物体は近づく。
3. すると2つの物体の間に働く重力はもっと大きくなる。
4. するとますます2物体は近づく。3に戻る。

こうして2物体は際限なく近づきます。こういった結果が原因を助長する仕組みのことをポジティブフィードバック(正のフィードバック)といいます。

1. 勉強がわかる。
2. やる気がでる。
3. ますます勉強がわかるようになる。
4. ますますやる気がでる。3に戻る。

といった例のようにポジティブフィードバックはありふれています。その結果、超やる気のある人と全くやるきのない人に2分化します。宇宙でも、冷たく広がったガスと、熱く小さく固まった星とに2分化します。決して等温度の均一な宇宙にはなりません。それはひとえにこの重力のせいです。

星はいろいろな力を使って、重力崩壊から免れようとします。にもかかわらずとことんまで重力崩壊していった天体がブラックホールなのです(表 2.3-1)。

表 2.3-1 重力に抗して星を支える力

天体	密度	支える力
惑星	1 から 5g/cm^3	電子の反発力(クーロン力)
星間ガス		ガスの圧力(温度)。温度が低いと力は小さい。
原始星		ガスの圧力(温度)。ガス雲が縮んでいくことで重力エネルギーを熱エネルギーに変えて温度を維持しています。
恒星	1g/cm^3	ガスの圧力(温度)。水素の核融合で熱を発生させ高温を維持しています。
白色矮星	1 万トン/ cm^3	電子の縮退圧(しゅくたいあつ) (縮退圧: 電子同士には言わば「なわばり」があって、2 個を近づけると、ある距離以下で巨大な反発力が働きます。アイデンティティの発現とでも言えましょうか。クーロン力よりも大きく、温度に依りません。)
中性子星	10 億トン/ cm^3	中性子の縮退圧 (しかし更に圧力を上げると、さすがの電子の縮退圧でも支え切れません。電子は逃げを決め込み、陽子と合体して中性子になります。中性子も電子と同じフェルミオンといわれる粒子なので縮退圧が働きます。その力は質量が大きいぶん電子のより大きく、より重い力に耐えられます。)
ブラックホール	無限大	なし (質量がそれより大きい場合、最終的には重力が勝ち、星は1点まで収縮しブラックホールになります。)

<星の分類>

夜空を見上げると、明るい星もあれば暗い星もあります。赤い星もあれば青い星もあります。星をみてすぐ分かるのは明るさと色です。

<等級>

星の明るさは、当初、一番明るい1等星から肉眼でぎりぎり見える6等星までの6種類に分類されました。近代になって機械で明るさを測ってみると、1等星と6等星の明るさの差は100倍でした。また人間の眼の感じ方は「倍倍ゲーム」であり、2.51倍明るいとは1等級明るく感じるようです。そこで、1等星は2等星の2.51倍、2等星は3等星の2.51倍、、、5等星は6等星の2.51倍になるように等級を決めました。1等星は6等星の2.51の5乗倍、つまり100倍明るいわけです。

この定義を使えば2.4等級などと小数で正確に表すことができます。また、1.0等級より2.51倍明るいのは0.0等級、さらに2.51倍明るいのは-1.0等級と、負の数を使って表すこ

ともできます。全天一明るいシリウスは-1.5 等級です。太陽は-26.8 等級、満月は-12.6 等級、金星は最大-4.7 等級です。

恒星の分類

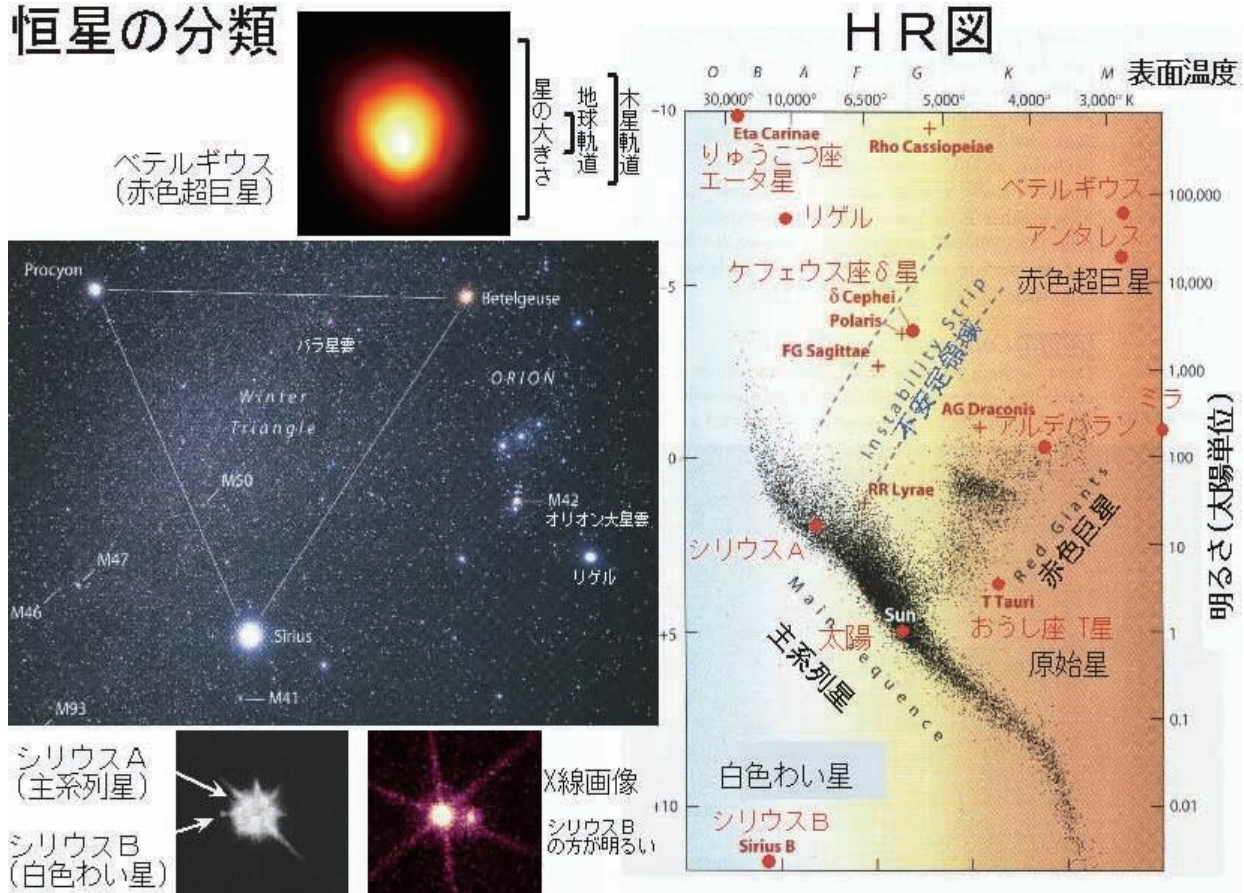


図 2.3-14 恒星の分類(<http://hubblesite.org>, Sky & Telescope, Chandra 衛星の HP)

<本当の明るさ>

しかし星には近い星、遠い星といろいろありますから、距離が分からなければ星の本当の明るさは分かりません。1990 年頃ヒッパルコス衛星は三角測量(年周視差)によって 20853 個の星の距離を 10%以上の精度で求めました。

<星の色>

次に気付くのは、星の色です。オリオン座の右肩の星 ベテルギウスは赤い星です。オリオン座の左足の星 リゲルは青い星である。星の色は表面温度を表しています。赤い星は温度が低く(3000 度程度)、青い星は温度が高い(1 万度程度)星です。太陽は黄色っぽい星で、温度は 6000 度です。

こうして星の色と本当の明るさという 2 つの情報が分かったので、色を X 軸に本当の明

るさを Y 軸にして、グラフを書いてみます。最初にこの図を書いた人達の名前を取って、この図をヘルツシュプルング＝ラッセル図、略して HR 図といいます。

2. 3. 4. 1 主系列星

大抵の星は HR 図の左上から右下に至る線上に並ぶことが分かりました。明るい星は表面温度が高く、暗い星は温度が低いわけです。ほとんどの星がこの系列にあるので、これを主系列といいます。太陽も主系列にありちょうど真ん中あたりに位置します。主系列は水素の核融合で光っている星です。

2. 3. 4. 2 赤色巨星

赤い星、つまり表面温度が低いにもかかわらず、本当の明るさが太陽の 100 倍とかいう明るい星もあります。おうし座の α 星 アルデバランなどです。これはつまり大きさがとても大きい星で、半径が太陽の 100 倍もあります。金星軌道くらいの大きさです。赤色で大きな星なので「赤色巨星」と呼ばれます。これは星の末期の姿です。太陽もあと 60 億年すればこのような星になると考えられています。水星と金星は太陽に飲み込まれてしまうでしょう。地球は飲み込まれはしませんが、今の太陽の 100 倍の熱を至近距離から受け、灼熱の世界と化すでしょう。

<赤色巨星が巨大なわけ>

恒星は中心部で、水素を核融合させヘリウムに変えています。「燃えカス」であるヘリウムは星の中心にたまっていきます。ヘリウムコアの表面で水素が核融合しているので殻燃焼といいます。太陽の場合、100 億年たつと全質量の 10%がヘリウムに変わり、中心にヘリウムのコア(芯)ができます。

これほどヘリウムがたまるとヘリウムコアの存在が無視できなくなります。つまり、ヘリウムコアだけみると 1 つの星をなしているので、自分の重力で縮もうとします。普通は星は中心で核融合を行っていて、その熱で、縮もうとする重力を支えています。しかしヘリウムコアの中には熱源がないので、自分の重力で縮んでそれによって発生する熱で星を支えるしかありません。縮むときの熱を放出してヘリウムコアは光ります。

しかし殻状の水素燃焼層にとってみれば、自分の燃焼熱でそこより外側の層を支えていて釣り合いがとれているのに、中から余分に熱せられることになります。核融合反応は温度に非常に敏感です。ちょっと温度が上がっただけで反応が過剰になり、必要以上の熱を外側の層に与えるようになります。すると外層は膨らみます。膨らむと温度が下がります。こうして赤色巨星になります。こうして核反応は主系列時代の 10 倍も盛んになります。

2. 3. 4. 3 赤色超巨星

赤色巨星の中にはベテルギウスのように太陽の1万倍とか明るいものもあります。これは赤色超巨星と呼ばれます。大質量星の末期であり、内部は、ネオンの層、炭素・酸素の層、ヘリウムの層、水素の層というように たまねぎ構造になっていると考えられています。おのおのの燃焼層で反応過剰が起こるので星が超巨大となります。ベテルギウスは500光年も離れているにもかかわらず、ハッブル望遠鏡で直接星の形が見えています。その大きさは太陽の1700倍もあります。内部はたまねぎ構造になっていますが、あとになるほど生成されるエネルギーは微小になっていくのであつという間に消費されます。太陽の18倍の星SN1987Aの場合、水素の燃焼は1000万年、ヘリウムの燃焼は100万年も続くのに対し、炭素の燃焼は1万2千年、ネオン・酸素の燃焼は12年、シリコンの燃焼は1週間しかもちません(P.54の表2.3-3参照)。そして鉄の崩壊によるⅡ型超新星へと突進していくのです。

2. 3. 4. 4 惑星状星雲

太陽の重さの3倍以下の星の場合、赤色巨星はその後も外層の膨張が続き、惑星状星雲となります。中心のヘリウムのコアはどんどん縮んでいきますが、あるところまで収縮すると熱で支えなくとも電子の縮退圧で支えられるようになります。となるともはや縮む必要はありません。この星が白色矮星です。1光年程度に広がった惑星状星雲、その中心に高温の白色矮星という図式になります。

2. 3. 4. 5 白色矮(わい)星

<シリウスBの話>

1800年代前半、シリウスの動きが蛇行していることが見つかりました。シリウスは全天一の明るさの恒星です。ひとえにそれは近いからです。肉眼で見える星のうちでは、ケンタウルス座 α 星について近いのです(8.6光年)。よって星の動き(固有運動)も良く分かります。蛇行運動はシリウスが連星系で、太陽程度の重さの星と連星をなしていることを表していました。シリウスの重さは太陽の2.3倍なので相手の星も同じくらい重いはずですが、しかしいくら見ても太陽のような明るい星は存在しませんでした。しばらく「目に見えないなぞの星」と思われていましたが、1862年新しくできた望遠鏡によりシリウスのすぐそばに8.6等級の白い星が見つかりました。その星をシリウスBといいます。シリウスAは-1.5等級なので、シリウスBはその10等級落ち、1万分の1の明るさしかありません。温度は32000度で、シリウスAの10700度よりも高いのです。温度が高いのにこんなに暗いのはなぜでしょう？ それは大きさが小さいからです。太陽の100分の1程度しかない計算になります。半径5400kmです。これは地球(半径6400km)程度です。それなのに太陽の1.02倍の重さがあります。表面の重力は地球の46万倍になります。本当にこんなに表面重力が大きいことは、スペクトル輝線の重力赤方偏移で確かめられました。

白色で小さいので、このような星は白色矮星と呼ばれます。実はかつての恒星の中心部であるヘリウムのコアや炭素・酸素のコアが露出している星であり、余熱で光っているのです。内部の熱を出し切ってしまうと温度は低くなって光らなくなり黒色矮星へと変化します。白色矮星は電子の縮退圧という力で支えられているので、温度が下がっても縮むことはありません。そのままの大きさで黒色矮星となります。しかしそれには100億年という長い時間がかかります。宇宙の初期にできた球状星団中の白色矮星がやっと黒色矮星になったかならないかくらいです。黒色矮星はそもそも暗いのでまだ見つかってはいません。

その昔はシリウス B はシリウス A より明るい星であったことでしょう。そのため先に進化し、赤色巨星になって、惑星状星雲になって、白色矮星が残りました。もし当時もシリウスが近くにあったのなら、1 等星の明るい二重星はきれいだったでしょうし、赤色巨星は金星よりも明るい燃えるような赤い星であったでしょうし、惑星状星雲も夜空に大きく広がりきれいであったでしょう。ただ星はめいめい勝手な方向に動いているので、地球からそれが見えたことはなかったでしょう。太陽に一番近い星なんて 10 万年程度で入れ替わるのです。

なお冬の大三角のもう 1 つ、こいぬ座のプロキオンにも白色矮星があります。白色矮星はこのようにありふれた星なのです。

2. 3. 4. 6 球状星団

球状星団というのは、恒星が 10 万から 100 万個程度、球状に集まった星団です(図 2.3-15)。大きさは 100 光年程度です。個々の星は球状星団の重心の周りを回っていますが、近くにある星に軌道を乱され結構バラバラに動いていることでしょう。球状星団は銀河系の周りに点在していて、銀河系の中心の周りを回っています。もし地球が球状星団の中にあれば夜空はさぞかしにぎやかでしょう。でもみんな赤い星なので面白くないかもしれません。球状星団の星は宇宙の初期に一度に作られその後は作られていません。誕生以来 100 億年程度たっているので、青い星は既に死んでしまい、もはや太陽程度より赤い星しかありません。HR 図を描いてみると主系列星が途切れて赤色巨星へと折れ曲がっています。折れ曲がり点にある星は、今まさに一生を終えようとしている星なのです。

M4 という球状星団の中には、かつての重い星の慣れの果てである多数の白色矮星が発見されています。恒星 10 万個に対し、4 万個の白色矮星があると推定されています。できたての熱い白色矮星から、100 億年もたってかなり冷えてしまった白色矮星までが観測されています。

中性子星も発見されています。中心に星が密集しているきょしちょう座 47 番星(47Tuc)という球状星団では、12 個ものミリ秒電波パルサーが見つかっています。これらは 2 ミリ秒から 6 ミリ秒と非常に速く回転しています。これらはもともと連星系で隣の星から落ち込んだガスによって加速されたと考えられています。

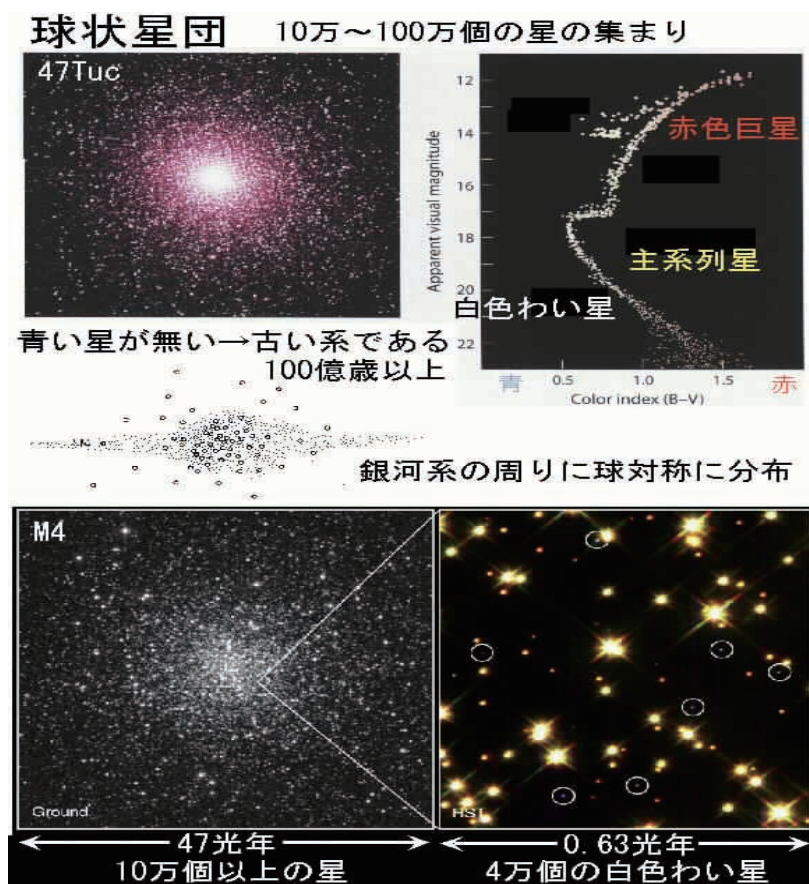


図 2.3-15 球状星団 (Sky & Telescope, <http://hubblesite.org>)

2. 3. 4. 7 中性子星

1967 年、PSR B1919+21 という電波天体から 1.337 秒程度で規則正しくパルスする電波が発見されました。通常の恒星や白色矮星がそんなに速い周期で回転すると遠心力で星がばらばらになってしまいます。こんなに速く自転できる星は中性子星しかないのです。予言されていた中性子星の発見でした。中性子星の半径は 10km です。東京の山の手線一周くらいの大きさです。でも重さは太陽の 1.4 倍程度もあります。表面磁場も強くて 10^{12} ガウスもあります。星の磁極が回転軸の北極と南極とずれているため、回転により電波が発生します。電波のビームが地球の方を向いたとき、強い電波が観測されます。ビームが外れているときには電波は来ません。電波はパルスのようにやってくるのでパルサーと呼ばれます。こんな星が 1.337 秒で 1 回転していたのです。最近は何と 1.5 ミリ秒で回転しているパルサー(1秒間に 600 回転！)も見つかっています。

回転による「発電」で電波を出しているので、回転はだんだん遅くなっていきます。それでも速い回転のエネルギーにより 1000 万年程度は電波を出し続けると考えられます。1054 年の超新星の残骸であるかに星雲の中心にパルサーが見つかったことから星の最後の姿としての中性子星が確立されました(図 2.3-16)。パルス周期は 33 ミリ秒です。1054 年に生まれた時は 19 ミリ秒で回転していたと逆算されています。

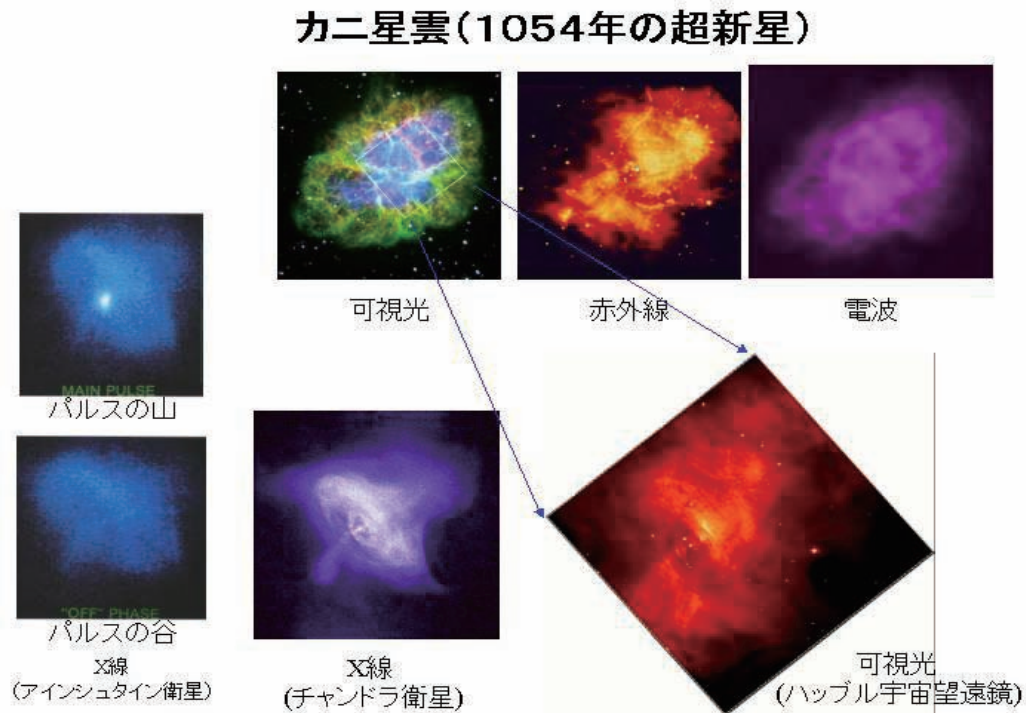


図 2.3-16 色々な波長(電波、赤外線、可視光、X線)でみたカニ星雲
(Chandra 衛星の HP、<http://hubblesite.org>、
「宇宙」ヘンベスト、スーテン共著 昭 60 年 教育社)

ハッブル望遠鏡による画像の中心やや左下にある2つの白い星の右側の方がかにパルサーです。かにパルサーからのジェットが上下に出ていて白いかすかな円弧状の形を作っています。何ヶ月かたつとこの円弧がさざなみのように動いているのがわかります。

1968 年には X 線でもパルサーが見つかりました。こちらは連星 X 線パルサーと呼ばれ、通常の恒星と中性子星の近接連星系です。通常の恒星の表面からガスをはぎとり、それが中性子星に落ちるときの重力エネルギーで光っています。ガスは磁力線に沿って中性子星の磁極に落ちます。磁極に落ちてきたガスは 10 億度以上の高温になり X 線を出します。中性子星の回転により地球から磁極が見えたり見えなかったりするので「パルス」を示します(ぎんが衛星によるヘルクレス座 X-1 の例; 図 2.3-17)。実際はパルスというより強度変化という方が合っているかもしれません。中性子星のようにサイズは小さくかつ質量の大きい天体では、重力エネルギーのほうが核融合より単位質量あたり多くのエネルギーを取り出すことができます。

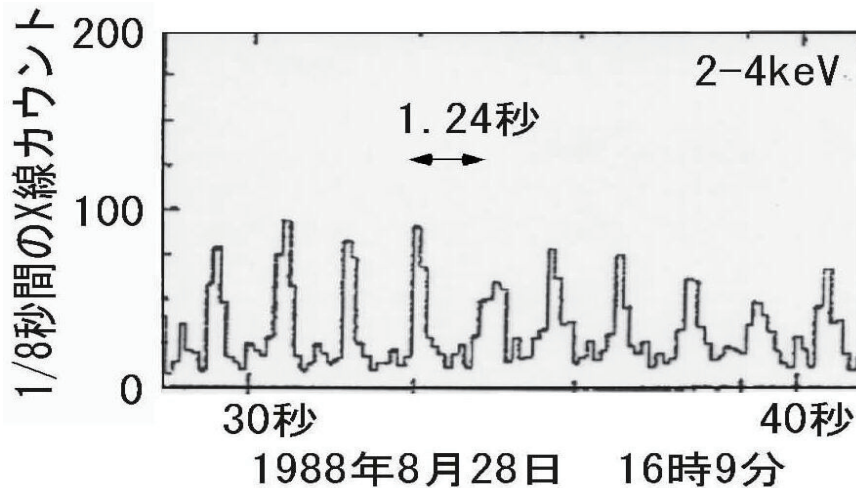


図 2.3-17 X線パルサー ヘルクレス座 X-1 の X線強度の変化
(X線天文衛星「ぎんが」のデータ)

電波パルサーは 1000 万年くらいたって回転エネルギーがなくなると、もはや電波を出さなくなり我々からは見えなくなります。また X 線連星パルサーも、隣の星のガスをほぼ吸い尽くしてしまうと X 線を出さなくなり、やはり我々からは見えなくなります。こうした「見えない」中性子星は多数あるでしょうが、あまりに小さいので発見されないだろうと思われていましたが、1996 年にハッブル望遠鏡により RX J185635-3754 という弱い X 線天体が単独の中性子星であることが発見されました(図 2.3-18)。温度が 70 万度以上あり距離も 400 光年以下と近いのに、明るさが 25 等級以下と非常に暗いのです。このことから星の大きさは半径 11km 以下であることが分かりました。こんなに小さく高温の星は中性子星しかありません。

可視光で初めてとらえた**単独中性子星** (ハッブル望遠鏡)



図 2.3-18 可視光で初めてとらえた単独中性子星(ハッブル望遠鏡のデータ)
(<http://hubblesite.org>)

2. 3. 4. 8 ブラックホール

ニュートンの万有引力の法則が出た当初、重力崩壊で大きさをゼロの点にまで縮み重力が無限大になってしまった物体が考えられました。それが最初のブラックホールです。しかし実際にはそんなものはないだろうと考えられていました。1916年にアインシュタインの一般相対性理論が提唱されてから、多くの学者がいろんな条件でアインシュタインの重力の方程式を解きました。第1次世界大戦中シュバルツシルドは志願従軍先の戦場で、真ん中に質点がある場合の方程式を解き、光さえも抜け出せない因果の地平（事象の地平）というものの存在を示しました。これが現代考えられているブラックホールです。

最初のブラックホール候補天体は白鳥座 X-1 という X 線天体です。小田稔はすだれコリメータを使って X 線天体の位置を精度良く決めました。そこを岡山観測所の望遠鏡で写真を撮ると9等の青白い星がありました。スペクトル観測からこの星は近接連星系であり大きくふらついていることが分かりました。太陽の30倍もの重い星をふらつかせているので、相手の星の質量は太陽の10倍以上ということになります。しかし可視光では見えていません。X 線はその「見えない星」から出ているらしいのです。X 線の強さは0.05秒以下で非常に速く変動し、X 線星の大きさが地球より小さいことを表しています。中性子星の最大質量は太陽のせいぜい2倍程度なので、そんなに小さくて重く見えない星はブラックホール以外に考えられません。我々はまだ事象の地平より内側が「黒い穴」になっているのを見たわけではありませんが、白鳥座 X-1 はブラックホールであることが濃厚です。というわけでブラックホール候補天体の第1号になりました。

では光でさえも逃げられないブラックホールから X 線はどのように出ているのでしょうか。「見えない星」は恒星の表面のガスを吸い込み、ガスは降着円盤となって「見えない星」に渦を巻いて落ちます（図 2.3-19）。ガスはブラックホールの強力な重力で加速され摩擦により温度が上がります。実際 X 線のスペクトルは1千万度のガスが出す形をしていました。X 線は落ち込むガスの最期の姿だったのです。

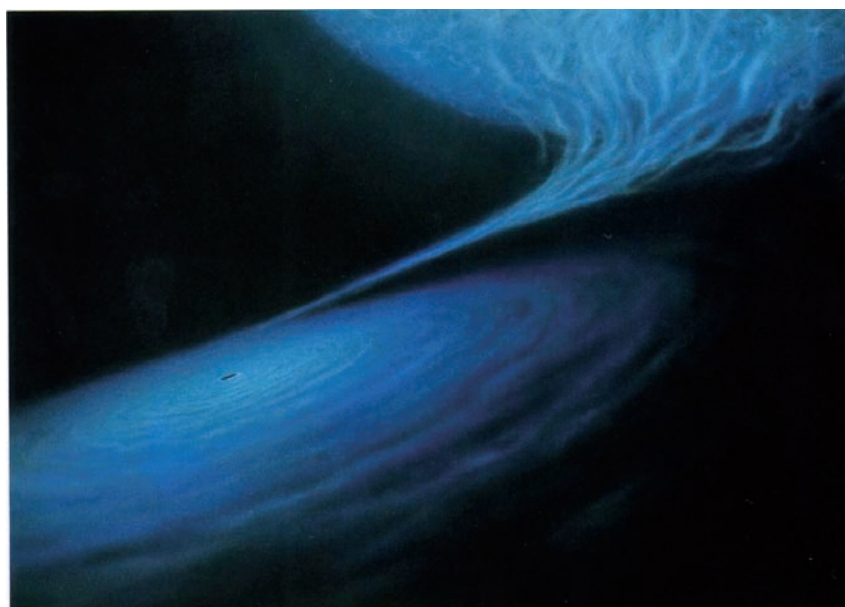


図 2.3-19 ブラックホールに落ち込むガスの想像図 (Sky & Telescope)

星の終末以外にもう一つブラックホールが存在するところがあります。活動銀河の中心核です。中心核を回るガスや星の動きから活動銀河の中心には太陽の1億倍程度の重さの天体があることが分かってきました。中心核は電波、可視光、X線とあらゆる波長の光を出していて、その強度は銀河全体の100倍にも達します。X線の時間変動から中心核の大きさは1天文単位程度以下であることが分かります。また銀河の大きさを超えてはるか宇宙空間まで100万光年も伸びるジェットを出している天体もあります。こんな小さくてエネルギーギッシュな天体はブラックホール以外には考えられません。しかしこれも事象の地平の決定的証拠をつかんでいないわけではないのでブラックホール候補です。

さてもし宇宙船に乗ってブラックホールに落ちていったらどうなるのでしょうか？ 広大な宇宙を旅していて大きさ10kmのブラックホールに落ちることはまずないでしょうが、ここでは運良く(?)遭遇したとします。まずブラックホールに落ちていく場合、重力に身を任せた自由落下なので別に重力は感じません。周りを見ると自分が加速されているのが分かるでしょうが、無重力状態のままです。しかし潮汐力により頭と足が引っ張られているような力を感じます。1000kmに近づくとこれが結構大きいので宇宙船や人はバラバラになるでしょう。しかし何とかがんばってクリアするとしましょう。そしていよいよ事象の地平を越えますが、そこを越えても何も起こりません。ブラックホールに入ったとは気づかないでしょう。ただ周りを見ていれば、星の見え方が変わるのに気づくでしょう。ここから電波を出しても永遠に外の世界には届きません。そして最後には中心の点状の天体に吸い込まれて終わりです。ブラックホールが回転している場合、星がつぶれていった先は点ではなく円環状になります。カーのブラックホールといいます。円環に当たれば終わりですが、うまく環の中に入ったりすると、、、何も起こらない、ワームホールやワープ、タイムマシンなどが言われていますが、想像の域を出ていません。

この節の題は「恒星の一生」としました。恒星としてはこのような一生をたどるので異存はありません。しかし恒星の一生が終わったから、あとは死んで大した事ないなんて思うと、今や間違いです。恒星が全てではありません。物質は物質であり続け、歴史は続き、恒星のあとには白色矮星、中性子星、ブラックホールが誕生します。恒星の状態は重力崩壊に抗するつかの間の過渡的状态なのです。電波天文学やX線天文学をやっているとパルサーやブラックホールがさかんに登場します。これらの天体ができたこれからが本番となります。超新星爆発は「恒星の一生の終わりの大爆発」ではなく「ブラックホール誕生の瞬間」と書きたいくらいです。宇宙の歴史の章(P.65)で見るとおり、恒星が光っている時代なんて宇宙の長大な歴史から見ればほんの一瞬なのです。

2.3.5 星のエネルギー源

太陽の出している熱(光)はいくらでしょうか？ 地球軌道では、太陽光線に垂直な面1cm²に毎分2calの熱がきています(=1400 J/m²/s)。これを太陽定数といい、年によらずほとんど一定です。太陽から四方八方に等方に熱が出ているとすると、太陽が出している全熱量は、太陽定数に地球軌道の半径を持つ仮想的な球の表面積をかけて、 $1400 \times 4\pi(1$

億 $5000 \text{ 万 km} \times 1000)^2 = 4 \times 10^{26} \text{ J/s}$ です。さて、この途方もないエネルギーは核融合であることは今や常識ですが、どうしてそういう結論になったのでしょうか？ ここでは広く星のエネルギーを探ってみます。

2. 3. 5. 1 星のエネルギー源

1. 石炭

昔から身近なエネルギーといえば、まきや炭でしょう。ここでは太陽が石炭だったらどのくらいもつのか考えてみましょう。空中高く石炭の塊が赤々と燃えているのを想像してください。石炭 1 g が燃えると 9 kcal^1 の熱が出ます。石炭 1 kg が燃えて出る熱量は $3.6 \times 10^7 \text{ J}$ です。質量エネルギーの 4×10^{-10} (100 億分の4) が熱に変わります。太陽の質量は $2 \times 10^{30} \text{ kg}$ なので太陽が全部燃えると $7.2 \times 10^{37} \text{ J}$ の熱量がでます。太陽の明るさは $4 \times 10^{26} \text{ J/s}$ なので、6000 年もつ計算になります。古代文明から今までくらいです。

2. 重力

ニュートンが重力を定式化してから、重力エネルギーというものが定量化されました。 $E = -GMm/R$ 、 M は星の質量、 R は星の半径、 m は落とすものの質量。ものを落とすと重力に引かれてスピードが出ます。地面についたとたん摩擦等で熱に変わります。重力エネルギーを熱に変えて光ることができるわけです。

大きなガス円盤が収縮して星が形成されるときも、ガスが持っていた重力エネルギーが熱に変わります。この場合、重力を及ぼす天体はガス自身²ですので、自己重力エネルギーといいます。 $GM^2/(2R)$ になります。太陽が持つ自己重力エネルギーは、 $2 \times 10^{41} \text{ J}$ なので、1600 万年輝ける計算になります。1 億年前の恐竜の化石が見つかったことを考えるとこれでも短いです。しかし生まれたばかりの星である原始星は重力エネルギーで光っている星です。

太陽の場合、無限遠から表面まで物を落としたときの重力エネルギーは落とすものの静止質量の 10^{-6} になります。これだと核融合のエネルギー変換効率より少ないです。例えば太陽の3から8倍の重さの星で一生の最後に炭素の核融合暴走が起こった時、この核融合エネルギーは重力エネルギーより大きいので、星全体を木っ端微塵に吹き飛ばすことができます。

しかし、中性子星ともなると、 M は太陽と同じくらいなのに R が 10 km と小さいので、落とすものの静止質量の 10^{-1} をエネルギーに変えることができる。これは核融合より効率がよいわけです。X 線連星では隣の星から降り積もって表面にたまっているガスに一挙に核融合反応が起こって爆発(X 線バースト)を起こすことがあります。爆発した物質は一旦は舞い

¹ 注。栄養学では kcal のことを単にカロリーともいう。人間が1日に必要なカロリーは2000 カロリー程度。人間1人は $2000 \times 4.2 \div (24 \times 60 \times 60) = 100 \text{ W}$ の発熱量である。

² 落ちたガスは星に合わさり、星はだんだん重くなっていく。つまり星の形成の最初に落ちた 1 kg の石より、最後のほうで落ちた 1 kg の石のほうが大きなエネルギーを出す。 M は最終的にできた星の質量なので、最初はあまりエネルギーが出なかったことにより、式に $1/2$ が付く。

上がるものの、また表面に戻ってきます。核エネルギーでは中性子星の重力エネルギーに勝てないのです。

隣の星から降ってくる物質も途中高温になった時点で核融合反応をするでしょうが、その程度のエネルギーでは中性子星の重力から脱出できないので、そのまま中性子星に落ちることになります。

3.核融合

水素の核融合反応においては、反応の前後で粒子の質量合計が 0.7%減ります。この欠損分がアインシュタインの $E=mc^2$ の式により計算される量のエネルギーに変わるのです。その発熱量は 1kg あたり 6×10^{14} J です。太陽の持つ核エネルギーは 1.2×10^{45} J になります。これにより太陽は 1000 億年輝けるわけです。しかし水素の 1/10 を使用した時点で赤色巨星になり一生を終わるので、太陽の実際の寿命は 100 億年です。太陽など主系列の星は、水素の核融合で光っている星です。一気に火がつけば星をバラバラにできるほどの核エネルギーですが、次節で述べる負のフィードバックにより中心でのみボソボソと核融合が起こって、長時間(太陽の場合 100 億年間も)安定してほぼ同じ明るさで輝くことができます。

表 2.3-2 物質 1kg からとりだせるエネルギー

エネルギー源	物質 1kg が発生できる熱	質量エネルギーのいくらか？
石炭	3.6×10^7 J	4×10^{-10} (100 億分の 4)
重力エネルギー(太陽)	1.8×10^{11} J	2×10^{-6} (100 万分の 2)
水素の核融合	6×10^{14} J	0.7% (千分の 7)
重力エネルギー(中性子星)	1.8×10^{16} J	20% (10 分の 2)

2. 3. 5. 2 星が爆発しないわけ

核融合というと核爆弾を思い起こす人も多いでしょう。爆発するものなのです。ではなぜ星は爆発しないのでしょうか？ 核分裂反応でも原爆では爆発しますが、原子力発電所では爆発していません。その差は何なのでしょう？ まずそもそも爆発とは何なのか考えてみましょう。

正のフィードバックと負のフィードバック

次節で述べる熱核反応は温度に非常に敏感です。温度がちょっと高いと反応は非常に盛んになります。それで、核爆弾の場合は、

1. 核反応がちょっと進んで熱が出る。
2. 温度が上がる。
3. 核反応がもっと盛んになる。
4. ますます温度が上がる。3に戻る。

こうして結果が原因を助長し、どんどん反応が盛んになってしまいます。このように結果が原因を助長することを、正のフィードバックといいます。P.38 でも述べました。このループで急激に反応が起こり爆発するわけです。

では星ではどこが違うのでしょうか。それは重力です。星の場合は、

1. 核反応がちょっと進んで熱が出る。
2. 温度が上がる。
3. 星が重力に逆らって膨張する。
4. 温度が下がる。
5. 核反応が治まる。

となっています。結果は原因を抑えるように働くのです。これを負のフィードバックといいます。負のフィードバックが働いているときは、反応は安定して進みます。

「熱を加えると（重力に逆らって膨張して）温度が下がる」という星ならではのプロセスがあるので、星は安定して長時間、輝けるのです。熱を加えると温度が下がるというところに注目して、星は「負の比熱」だと難しく言ったりもしますが、実はそういうことです。

一気に核反応が進むと、核融合のエネルギーのほうが恒星の重力エネルギーより大きいので、星は爆発して飛び散ってしまいます。Ⅰ型の超新星はこの場合です。星が電子の縮退圧で支えられている白色矮星の場合には、この負のフィードバックが働きません。白色矮星にガスが降りつもり、炭素の爆発的燃焼が起こるとⅠ型超新星爆発を起こして星が木っ端微塵に吹き飛んでしまいます。

原子力発電では、核分裂反応が進んで水の温度が上がると制御棒が深く挿入され反応を治めます。この制御が自動的に機械で行われているので爆発しないのです。

2. 3. 5. 3 太陽の核融合

○ 熱核反応

核融合を起こすには2つの原子核を十分近くまで近づけてやればいいのです。そうすると「スッ」と自発的に融合して粒子やガンマ線が飛び出してエネルギーが出ます。そこでどうやって近づけるかですが、邪魔をしているのは電気力（クーロン力）です。プラスとプラスは反発するので、しかもクーロン力は重力と同じく $1/r^2$ の依存性を持つので、近くに行けば行くほど力はとても強くなります。この強大な力に打ち勝って近づけてやらなければいけません。加速器などで、加速して正面衝突させるという方法もありますが、そんな精巧なことはやってられません。

一番簡単なのは「温度を上げる」ことです。温度とは気体の分子の動く速さですから、温度を上げていけば分子のスピードも上がります。分子はランダムに運動していてしょっちゅう衝突を繰り返しています。温度一定といっても速い分子と遅い分子があります。物理学で

はボルツマン分布をしているといいます。運良く速い分子と速い分子が正面衝突すると核反応をするでしょう。これを熱核反応といいます。速い分子のみ反応すればいいので、温度が低くてもそれなりの核反応が起こります。もちろん温度を上げた方が速い粒子が増えるので反応がさかんになります。また密度をあげると衝突頻度が上がりますから反応がさかんになります。

よって温度をあげ密度を上げると核反応が進みます。地上の核融合炉では1億度を目指していますが、太陽の中心では1500万度で核融合が進行しているのは、密度が高いからです。

＜太陽の核反応＞

水素の核融合は4つの水素原子が合体して1つのヘリウム原子になる反応ですが、実際に4つの水素原子が1ヶ所で衝突して1つのヘリウム原子になるという反応が起こっているわけではありません。この反応が起こるには4つの水素が一度にぶつかなければならないのですが、そんなことはめったに起こりません。スクランブル交差点で4人が一度にぶつかることはまずないでしょう。太陽で主に起こっている核融合はppチェーン(陽子陽子連鎖反応)と呼ばれている一連の反応です(図 2.3-20)。

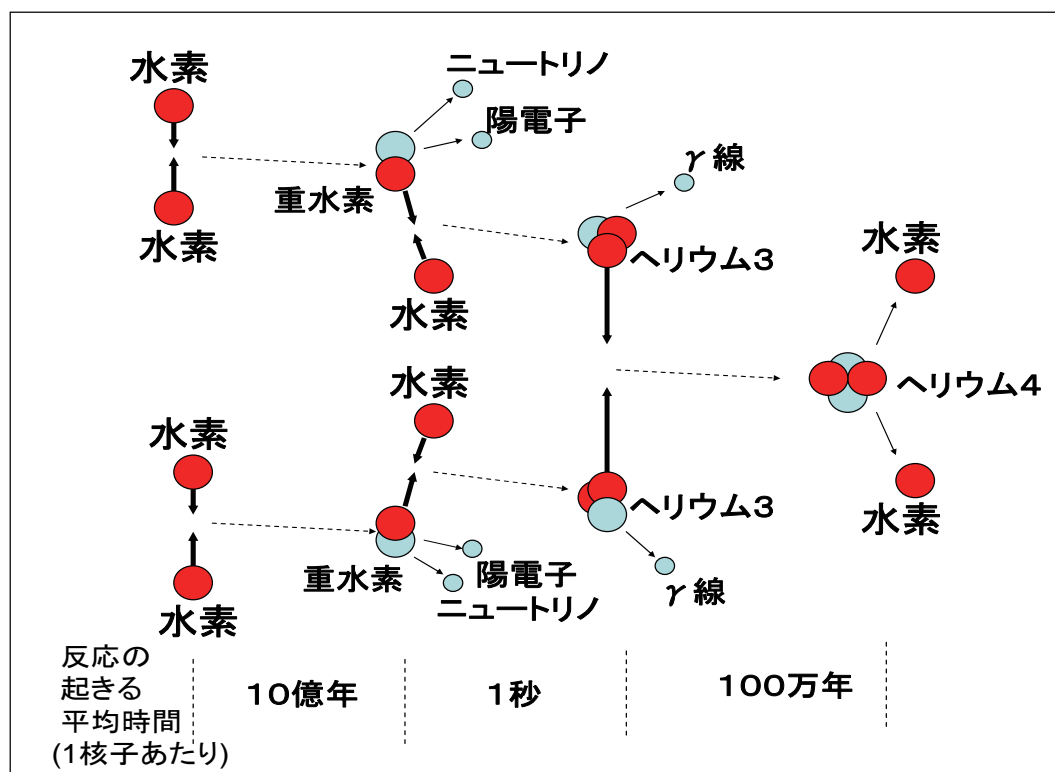
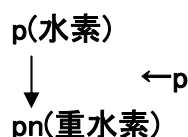


図 2.3-20 ppチェーン(陽子陽子連鎖反応、pp連鎖反応)

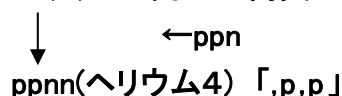
反応1. まず陽子に別の陽子がぶつかって重水素になります。この時、陽電子とニュートリノが出ます。陽電子は周りの電子とぶつかって消滅し、ガンマ線になります。ガンマ線は周りの電子に吸収され熱に変わります。ニュートリノは非常に反応しにくいのでそのまま宇宙に抜け出ます。



反応2. 重水素に陽子が融合します。ヘリウム3になります。その際ガンマ線が出ます。



反応3. ヘリウム3同士が衝突してヘリウム4(普通のヘリウム)になります。



結局4つのpが1つのヘリウム4に変わっています。

<熱核融合が温度に非常に敏感なわけ>

pp連鎖反応で述べた1つ1つの反応の確率が、たとえば温度が2倍になると2倍大きくなるでしょう。

反応1が2倍盛んになると、重水素が2倍できます。

反応2では、材料の重水素が2倍あり、反応率も2倍なので、4倍のヘリウム3ができます。

反応3では、ぶつかるヘリウム3の数が4倍あり、ぶつかるヘリウム3の数も4倍あり、反応率は2倍になっているので、ヘリウム4は32倍できます。

反応率は2倍にしかっていないのに核反応の数は32倍(2の5乗)にもなります。

このように多段の核反応は熱に非常に敏感なのです。

他に pp 連鎖反応にはヘリウム3から $\text{Be}7 \rightarrow \text{Li}7$ を経由する反応、 $\text{Be}7 \rightarrow \text{Be}8$ を経由する反応もあります。こちらの方が多段なので温度依存性は大きいです。

重い星では CNO サイクルといって炭素、窒素、酸素を触媒のように利用して水素をヘリウムに変える反応が主に起こっています。CNO 反応の方が多段で温度に非常に敏感なので、2000万度以上では CNO サイクルのほうがpp連鎖反応より盛んになります。

2. 3. 6 元素合成 ―みんな星の子―

<ガモフの夢>

アインシュタインの重力の方程式は膨張宇宙を示唆していました。実際にハッブルの法則も発見されました。それを受けてガモフは「宇宙は昔は小さくて、熱い火の玉から始まった」というビッグバン宇宙を提唱しました。そのガモフの夢とは「宇宙の初期、火の玉がまだ熱かった時に核反応が起こり、原初の水素から全ての元素が合成された」という説です。後の定量的な計算によりこの夢は真実ではないことが分かり、夢に終わりました。ビッグバンはあまりに急激に冷えるので、重量比で言って全物質の 25%がヘリウムに変わった時点で反応が止まるのです。それより重い元素はビッグバンでは合成されません。でも、これは実はラッキーなことでした。もし核反応がもっと進んで、全ての物質が一番安定な鉄になってしまっていたら、もはや核融合はできず、宇宙に星は輝きはしなかったでしょう。もちろんわれわれのような、炭素や酸素や水素でできている生物も生まれなかったでしょう。

<ヘリウムから鉄まで>

それでは、ヘリウムより重い元素はどのようにして作られたのでしょうか？

それは恒星の中でです。太陽の 3 倍より重い星では、核融合の燃えかすであるヘリウムも核融合を行い、炭素や酸素になります。星の重さが重いと、さらに炭素や酸素も核融合を行いネオンやマグネシウムに、さらにはシリコンや硫黄になります。そしてシリコンや硫黄が核融合し鉄ができます。星を輝かせているエネルギー源の核融合反応でできる元素は鉄までです。この一連の反応の後半は出るエネルギーが少ないので、下表のように水素燃焼と比べるとあっという間に反応が進みます。シリコンや硫黄が反応を始めると星の余命は1週間しかありません。

表 2.3-3 SN1987A (太陽の 18 倍の質量) の場合

反応	出るエネルギー	反応温度	輝く時間	
水素 →ヘリウム	600 兆 ジュール/kg	1000 万度	1000 万年	
ヘリウム →炭素・酸素	60 兆 ジュール/kg	1 億 5000 万度	100 万年	赤色巨星に進化。
炭素・酸素 →ネオン・マグネシウム	50 兆 ジュール/kg	5 億度	1 万 2 千年	炭素・酸素は反応が激しいので速く燃えてしまいます。
ネオン・マグネシウム →シリコン・硫黄	—	—	12 年	
シリコン・硫黄 →鉄	—	—	1 週間	鉄は 50 億度で光崩壊を始める。それがⅡ型の超新星爆発を引き起こします。

<鉄からビスマスまで>

それより重い元素の鉄からビスマスまでは、星の中心部で核反応によって作られます。これはsプロセス(スロープロセス)と呼ばれています。水素などの核融合反応において中性子が発生します。その中性子の中には最初からあった鉄の原子核に衝突し、核反応を起こすものもあります。こうして原子核は原子量が1つずつ重くなって行きます。ある程度、中性子が多くなると β 崩壊を起こし、原子番号が1つ上の元素に変わります。でもこの反応は何万年もかけてゆっくり進むのでスロープロセスと呼ばれています。ゆっくりとした反応なので安定な原子核しか最終的に生成されません。タングステン、金などはこの反応で作られます。この核反応は星の燃料としての反応ではないので、その生成量は少ないのです。

<ビスマスより重い元素>

ウランなどビスマスより重い元素は、超新星爆発で作られると考えられています。超新星爆発の瞬間には爆発の衝撃波面など、大量の中性子が発生する場所があります。そこで鉄などが大量の中性子を一気に吸収し、「中性子過剰核」という状態になります。中性子過剰核は不安定なのですぐに崩壊して行き、準安定なウランなどに行きつきます。

いずれにせよ、ヘリウムより重い元素は、星の進化の過程で作られ、超新星爆発でまき散らされます。そしてガスやチリとなり、その濃い所が重力収縮してまた星が作られるのです。

我々の体を作っている炭素や酸素も、何十億年か昔には燃えたぎる恒星の中心部にあったことは間違いありません。我々は「星の子」なのです。目の前の本棚の鉄だって一時期には、大質量星の中心の何億度という高温の中、勢いよく飛び回っていたに違いありません。「それがこんなにコチコチに冷たくなって」としばし感慨にふけるのです。

2. 3. 7 われわれの銀河、ドレークの式

2. 3. 7. 1 われわれの銀河(天の川)

我々が見る天の川は、地平線から上り、上の方を通り、ほぼ反対側の地平線に流れ下って、1本の川のように見えます。しかし実は地面の下(地球の反対側)でも続いていて、出た側の地平線につながっているのです。天の川の明るさは同じではありません。夏に見える天の川(いて座のあたり)は濃く、逆に冬に見える天の川(オリオン座のあたり)は薄いのです。これは銀河系の中心方向がいて座方向で、反対方向がオリオン座方向だからです。

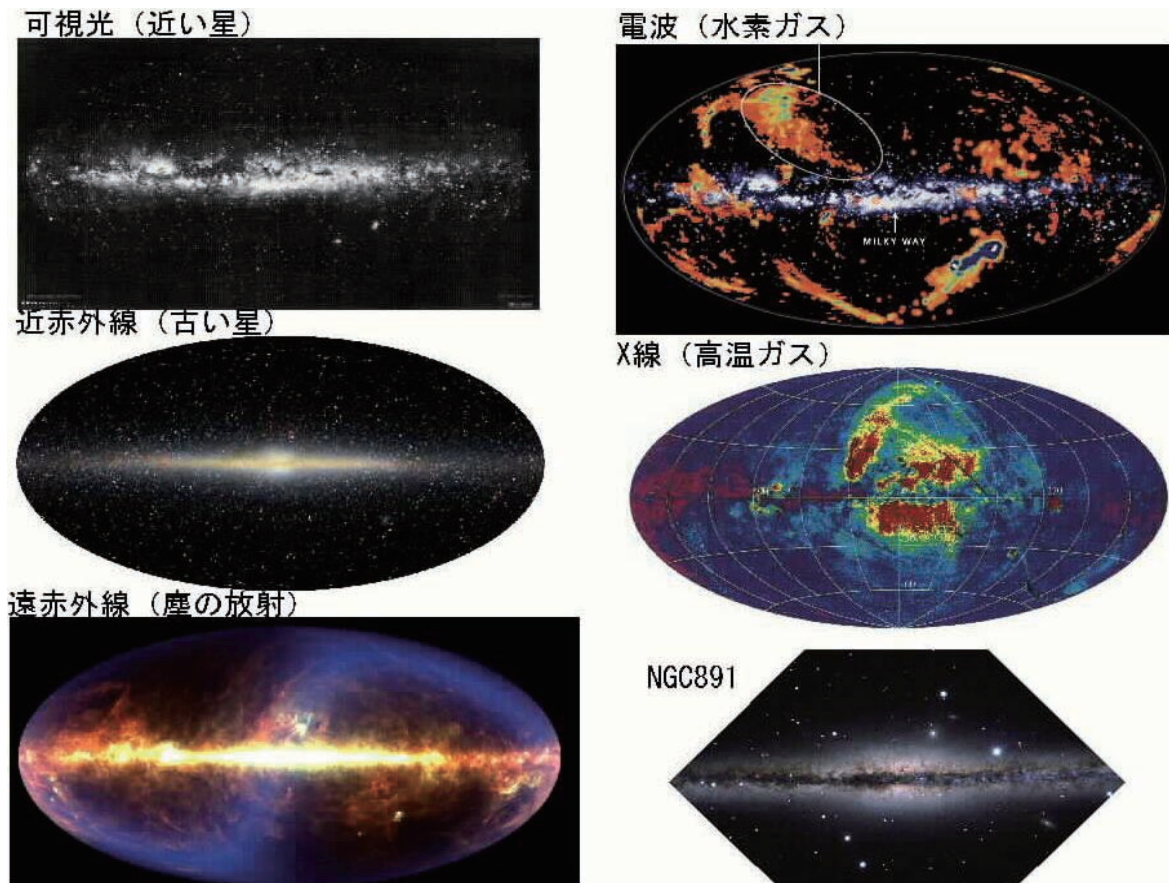


図 2.3-21 色々な波長でみた天の川と、比較のための NGC891

(NASA STScI-RR69, NASA PRC98-01, lund 天文台)

銀河系の中心を真ん中に、天の川を赤道にとった座標を「銀河座標」といいます。図 2.3-21 には、いろいろな波長で見た天の川を示しました。可視光で見る天の川は、太陽の近くにある銀河円盤の星が主です。コールサックのような暗黒星雲も多く見えます。可視光では若い星が多く見えますが、これは表面温度が高くて可視光や紫外線を多く出しているからです。近赤外線では逆に、銀河系の中心あたりの星の集まり(バルジ)が見えます。バルジには古い軽い星が多く、表面温度が低いので近赤外線を多く出しています。我々の銀河系のバルジをはっきり見たのはこれが初めてでした。同じ赤外線でも遠赤外線では、近くにあるチリの放射が見えてきます。青い帯に見えているのは、太陽系内の惑星回転面にたまっているチリです。水素ガスの出す電波では、銀河面に落ちてくる水素ガスの塊や、大マゼラン星雲の後ろに尾を引いている水素ガスが見えています。X 線では近くの超新星残骸が弧状に見えています。ローカルバブルという超新星残骸の中に太陽はすっぽりと入っています。最後に右下には NGC 891 というよその銀河を載せました。ちょうど横から見ている銀河で、地球から見た天の川によく似ていますね。

我々の銀河系は(棒)渦巻き銀河で、差し渡しは10万光年。約2000億個の星からなっています。といっても1個1个数えたわけではありません。回転速度から求められる銀河の質量からの推定です。太陽は中心から3万光年離れたところにあります。中心部の膨らんだところはバルジと呼ばれ、古い星の集まりです。バルジは直径1万5千光年のほぼ球形

をしていて、その星は銀河中心の周りをめいめい回っています。100 億から 140 億年前、銀河系ができたときに最初にできた星々です。

太陽のあるところは銀河円盤で厚みは3000光年程度です。銀河円盤の星は銀河面を上下しながらほぼ円盤上で銀河中心の周りを回っています。渦巻銀河には腕と呼ばれる明るく見えるところがあり、太陽も現在はその腕の1本の「オリオン腕」の中にいます。その内側には「いて座腕」、外側には「ペルセウス腕」があります。腕の太さはやはり3000光年くらいです。我々が肉眼で見る明るい星は、遠い方のベテルギウスでも500光年なので、オリオン腕の一部にしか過ぎません。

太陽が銀河系を一周するのに約 2 億年かかります。太陽が生まれてから 25 周もしているわけです。中心に近いほど回転速度は速く外側はゆっくりですから、25周もしていればきつく巻きついてしまっているはずですが、腕は星が密集している場所で、いわば交通渋滞の個所だと理解されています。1個1個の星は、渋滞に入り、渋滞し、渋滞を抜けているのですが、渋滞はいつもそこにあります。星密度が高いとガスも圧縮され、星が生まれます。いろいろな質量の星が生まれますが、目立つのは明るい大質量の星です。大質量の星は短命ですから、1000 万年程度で一生を終えてしまいます。銀河系を1周もできません。ちょうど腕を通り抜ける時間くらいしか生きられません。そうです。若い星が生まれ、輝いているところが腕として見えるのです。

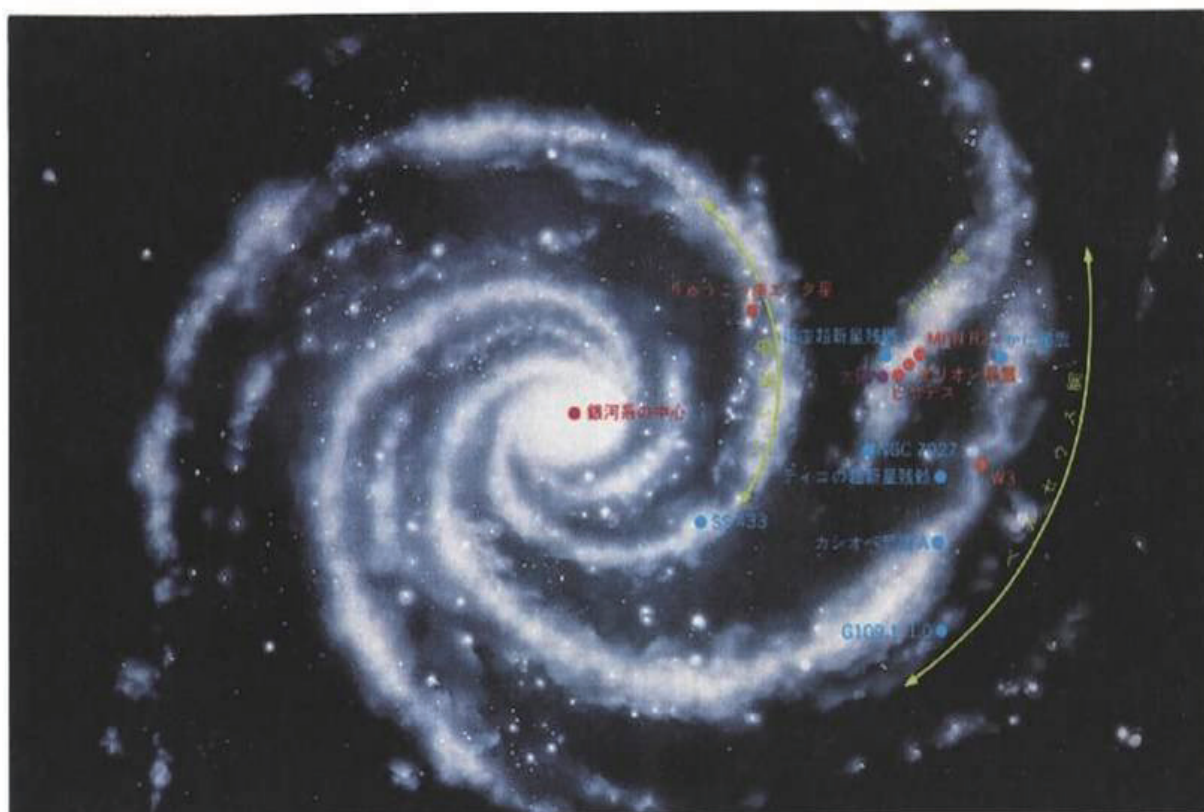


図 1.9 太陽（紫の点）は銀河系の中心から 3 万光年の渦巻きの腕の一つから分かれた部分にある。オレンジの点は星の誕生と若い星の領域で、第 4 章であつた。青い点は、第 5 章でのべる惑星状星雲と超新星の残骸である。これらも、星やガスと同様に渦巻きの腕に集中している。第 8 章では銀河系の中心（赤い点）と銀河系自身についてあつた。

図 2.3-22 上からみた我々の銀河系(天の川)の想像図
 (「宇宙」ヘンベスト、スーテン共著 昭 60 年 教育社)

2. 3. 7. 2 ドレークの式

我々の銀河系には約2000億個の星があります。この中に、人類のような知的文明を持った星は何個あるでしょうか？その問題を最初にまじめに考えた人がドレーク氏です。1960年ごろ提唱したドレークの式が有名です。今では宇宙の歴史に対する知識、生物に関する知見、地球に対する知識が当時よりずいぶん進み、この式に異論は多々あるところですが、考え方の1つとしてドレークの式を示しておきます。

我々の銀河系にこの瞬間に存在する知的文明の数 N を計算してみましょう。ここでいう知的文明とは電波技術を持ち電波通信ができるという意味です。ちなみに人類が電波技術を手にしてからはまだ100年しかたっていません。この式では定常状態を考えています。一方で文明が生まれ、一方で寿命のきた文明が減んでいるが、存在する総数は一定で変わらないというのが定常状態です。

表 2.3-4 のようにパラメータ R 、 f_p 、 n_e 、 f_l 、 f_i 、 f_c の数値を仮定すると年間何個の文明が生まれるかが次のように計算できます。

$$R \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c = 10 \times 0.5 \times 2 \times 1 \times 0.1 \times 1 = 1$$

年間1個の文明が生まれている計算になります。

表 2.3-4 ドレークの式のパラメータ

R (rate)	まず1年間に生まれる恒星の数を R とする。銀河系には2000億個の星がある。これがビッグバンからこのかた200億年間にできたとなると $R = 2000 \text{ 億} / 200 \text{ 億} = 10$ 年間10個の恒星が生まれる勘定になる。
f_p (fraction of planets)	そのうち惑星系を持つものの割合。連星系だと惑星が安定に存在できないかもしれない。 $f_p = 0.5$ としよう。
n_e (number of earths)	その惑星系にある地球型惑星の数。太陽系の場合、地球と火星と考えて $n_e = 2$ としよう。
f_l (fraction of life)	その地球型惑星で生命が生まれる確率。これはよく分からないが、無機物のスープで雷が飛ぶと有機物ができそうだから、 $f_l = 1$ としておこう。
f_i (fraction of intelligence)	その生命が知性を持つ割合。アメーバから猿とかまで進化する確率。これも分からないが、 $f_i = 0.1$ としよう。
f_c (fraction of communication)	猿が通信技術を持つまで進化する確率。まあ、猿までくればそのうち進化して通信技術を身につけるであろう。 $f_c = 1$ とする。

ではこの瞬間何個の文明があるかということになると、このような文明が何年生き延びるかを仮定すると計算できます。 L (life) を文明の寿命、「電波通信技術を発見してから文明が減びるまでの年数」とすると我々の銀河系にこの瞬間に存在する知的文明の数 N は、

$$N = R \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L$$

これがドレークの式です。

表 2.3-5 ドレークの式で見積もった文明の個数

L: 文明の寿命	N: この瞬間の文明の個数	銀河系の星の数に対する割合
100 年。今すぐ核戦争が起こって文明が減る場合。	100 個	20 億個に1個
1 万年。古代文明ができてから今までの間くらい。	1 万個	2000 万個に1個
1 億年。恐竜と同じく1億年間栄える場合。	1 億個	2000 個に1個
50 億年。太陽が燃え尽きるまで。	50 億個	40 個に1個

これらの数字を多いと思うでしょうか？ 少ないと思うでしょうか？

<どのあたりまで通信できるか？>

では現実問題としてどのくらい遠くまで通信できるのでしょうか？ 向こうの星のTV局が地球程度の1メガワットの大出力で放送しているとします。それを今地球にある最大の電波望遠鏡(直径100mのパラボラアンテナ)で最高の受信機を使って受信するとしましょう。どのくらいの距離まで受信できるでしょうか？ 1. 3光年です。隣の星までは届きません。もしケンタウルス座アルファ星に地球程度の文明があっても我々には分からないのです。もちろん我々の電波歴100年に比べれば相手の星はずっと進化している可能性が高いので、もっと桁違いに強い電波を使っているかもしれません。すると我々にも電波を受けるチャンスはあります。

では、お互い位置が分かっている、送信側も直径 100m のパラボラアンテナで地球めがけて送信したとしてみましょ。すると3000光年まで届きます。だいたいオリオン腕の幅くらいの半径の球内です。これなら近くの星とは通信できそうです。しかし向こうの星がパラボラアンテナで地球めがけて電波を発信してくれていたら、です。ちなみに半径 3000 光年の球内に星は3億個あります。ドレークの式で $L=1$ 万年をとれば、この範囲内に15個の文明がある計算になります。向こうの文明は3億個の中から地球めがけて電波を送ってくれたのでしょうか？

また銀河系の中心(10 万光年)までは、現在の技術では全然届かないことも分かります。宇宙文明を確かめるには、未熟な地球の技術で弱い電波を送って何千年後の返事を待つより、進んだ文明が何千年か前に強い電波を送ってくれたことを期待して、今、耳をすませる方が得策であるようです。

<生命起源論>

生命とは何かと聞かれれば明瞭な答えに窮しますが、自己増殖する複雑な物質としておきましょう。地球の生命は、バクテリアから人間まですべてDNAという物質に基づいて自己増殖しています。生物はすべてバクテリアから進化したという証拠です。そもそも地球は45億年前に誕生しましたが、最古のバクテリアはいつ発生したのでしょうか？ 40億年前にはすでにいたようです。バクテリアの群生の痕跡が発見されています。そのあと多細胞生物に進化するには 30 億年もかかるのですが、地球が誕生して5億年後にはすでに、生命

が発生していたようです。

さて原始地球の大気はどのようなものだったのでしょうか？ おそらく今日で言う火山ガスのようなもので、窒素、二酸化炭素、水蒸気、メタン、アンモニアであったでしょう。メタンやアンモニアといったカタカナの聞きなれない物質も出てきますが、実はこれらは簡単な物質です。水素は原初からある物質です。そして恒星の内部では、炭素、窒素、酸素が大量に作られます。ヘリウムも星で合成されますが、化学反応をしないのでここでは重要ではありません。我々生物はほとんどこのCHONでできているのです。これは偶然ではありません。さてこのCHON(炭素、水素、酸素、窒素)のできる物質を考えてみましょう。下の星取表を見てください。2種類の単純な組み合わせでできるのが、先の物質なのです。

表 2.3-6 CHON(炭素、水素、酸素、窒素)の単純組み合わせでできる物質

	C	H	O	N
C	炭素	CH ₄ (メタン)	CO ₂ (二酸化炭素)	CN(シアン)
H	--	水素	H ₂ O(水)	NH ₃ (アンモニア)
O	--	--	酸素	NO _x (窒素酸化物)
N	--	--	--	窒素

原始地球の大気は原始の海にも溶け込んでいます。そこで放電(雷)が起こったり、太陽の紫外線が振りそそいだりました。当時は酸素はないので、オゾン層はなく、紫外線はそのまま地表に降り注いでいました。当時は月も地球に近く、高低差1kmにおよぶ潮汐が5時間ごとにありました。そこで化学反応が起こり、アミノ酸が作られたと考えられています。アミノ酸はそのうち合成してDNAができ、そして細胞へと進化します。こういうふうにと考えると、生命ができるまでの5億年というのは、短すぎないでしょうか？

星が生まれる場所は暗黒星雲(分子雲)です。そこにはアンモニアや一酸化炭素のほかにもさまざまな有機物が発見されています。1968年アンモニアが発見された翌年1969年にはホルムアルデヒドが発見されています。これはCH₂Oという簡単な分子ではありませんが有機物です。そして蟻酸HCOOHやメタニミンN₂CHNも発見されています。この2つが合成するとグリシンNH₂CH₂COOHという最も単純なアミノ酸ができます。こう考えると暗黒星雲の中でさうとう化学反応が進んでいるのかもしれませんが、我々を作っている炭素や酸素を宇宙空間にばらまいた超新星がいつ起こったかは知りませんが、5億年といわず十分な時間が暗黒星雲にはあります。そして生まれたての超明るい恒星からの強烈な紫外線もあります。原始地球は隕石や彗星の衝突でできたと考えられているので、彗星に含まれていた炭素などは、最終的に1cm²あたり20グラムも堆積していたと推測されます。生命は暗黒星雲で発生し、彗星によって地球にもたらされたのでしょうか？あるいは、地球が生まれる前に宇宙のどこかで栄えた文明が、自らのDNAをウイルスという形で原始地球に送り込んだのでしょうか？ウイルスであれば何年でも宇宙空間の中で生きてゆくのも可能なのです。

2.3.8 遠方に存在する天体

2.3.8.1 宇宙の階層構造

地球はほかの惑星、衛星、彗星などとともに太陽系を構成しています。その太陽系の大きさは約 100 天文単位 (1 光日程度) です。さらにその太陽系は他の 2000 億の恒星系とともに銀河系をなし、銀河系の大きさは 10 万光年にもおよびます。我々の銀河は 10 個程度の銀河で銀河群を作っていますが、一般的に銀河は 1000 個程度の銀河が集まり銀河団をなしています。銀河団の大きさは 1 千万光年くらいです。銀河団は隣の銀河団とつながり、超銀河団を作ります。超銀河団の間には銀河がほとんどないところがあり、ボイドと呼ばれます。こういう構造を宇宙の泡構造と呼びます。また銀河団が連なったグレートウォールが 5 億光年にわたって続いています。こういった構造を宇宙の大規模構造と呼び、大きさのスケールは 10 億光年です。このように宇宙は様々なスケールで階層を作っています。これを宇宙の階層構造と呼びます (図 2.3-23)。宇宙の大きさは 150 億光年で、10 億光年から 150 億光年の間の構造は現在調査中です。果たして泡構造がどこまでも続いているのでしょうか？

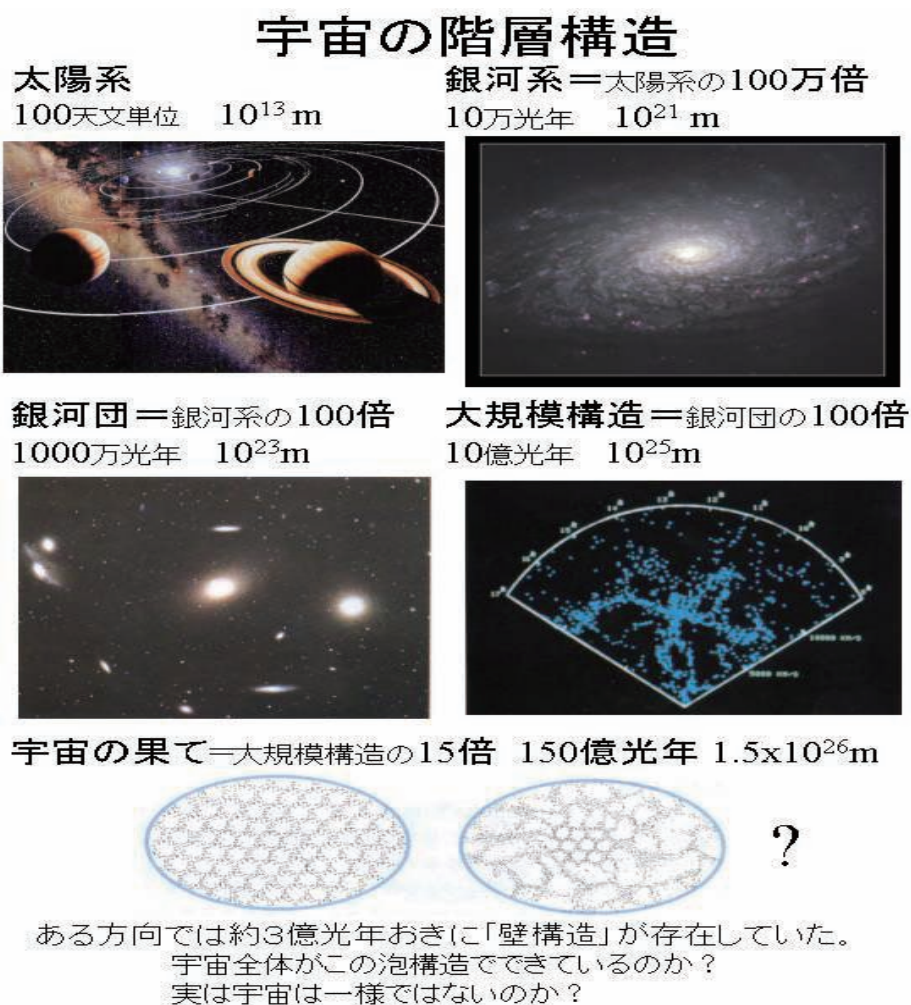


図 2.3-23 宇宙の階層構造 (すばる M63)

2. 3. 8. 2 電波銀河

距離 6000 万光年、最も近い銀河団である乙女座銀河団の中心に M87 という巨大な楕円銀河があります(図 2.3-24)。その中心から 10 万光年以上の距離にわたってジェットが飛び出していることが可視光の望遠鏡で捉えられています。電波でもジェットが観測されています。ジェットの根元を電波干渉計で精度良く観測すると、ジェットの塊が動いているのが見えます。その動きは 4 年間で 25 光年で、1 年間に 6 光年も動いている計算になります。光速の 6 倍のスピードです。こんなことがあってもいいのでしょうか？ このように光速を超える動きを超光速運動(スーパー ルミナル モーション)と呼びます。

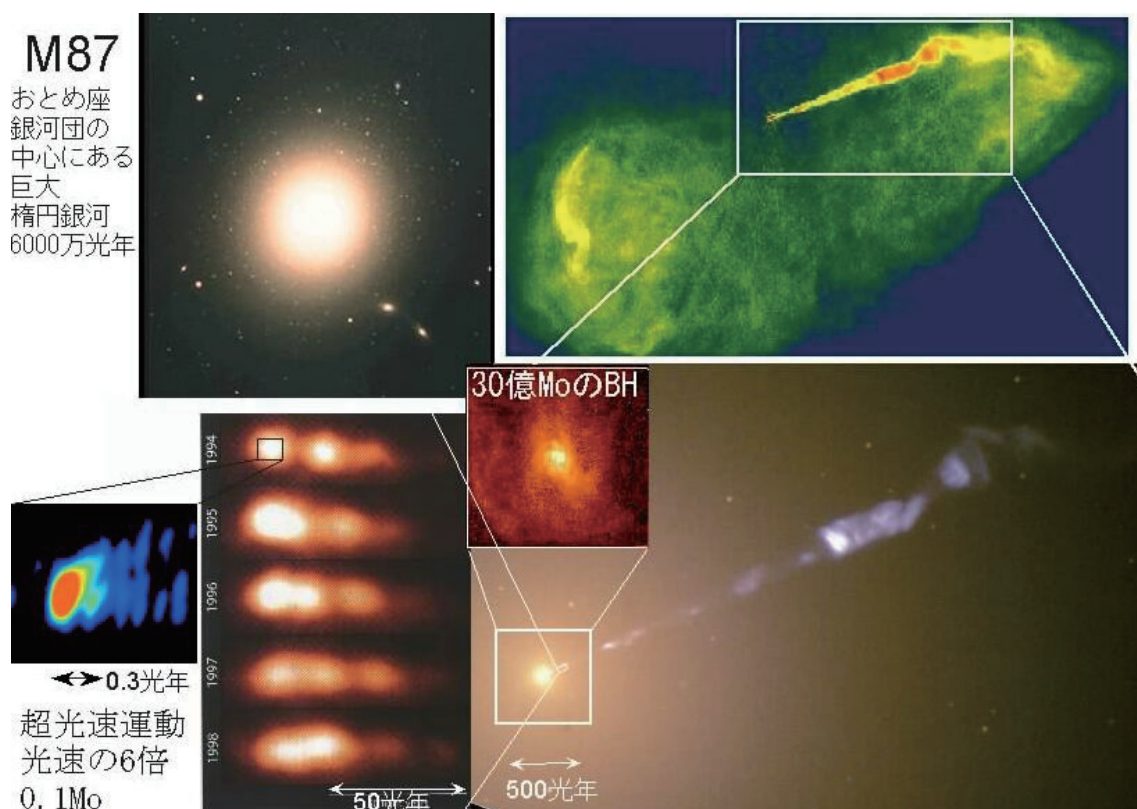


図 2.3-24 巨大楕円銀河 M87 と、その中心から噴出すジェット
(<http://hubblesite.org>, Space Science Telescope, Sky & Telescope)

でも実際は光速を超えて動いているわけではなく、光速に近い速度でほとんど我々の方向に飛んできているのだと理解されています。つまりジェットは真横に飛んでいるのではなく手前に飛んでいて、長さも実際は手前のほうにずっと長いのです。それを横に飛んでいると思って単純に計算すると光速を超えるのです。単に見かけ上のことです。

図 2.3-25 の左側の画像は電波銀河 NGC4261 を可視光でみた写真(白色部分)と電波でみた写真(橙色部分)を重ね合わせたものです。銀河の中心は星が密集していて明るい

ですが、そこをハッブル望遠鏡で見ると右側の画像のように、中心核を取り囲んでいるチリの円盤がシルエットとなって見えます。

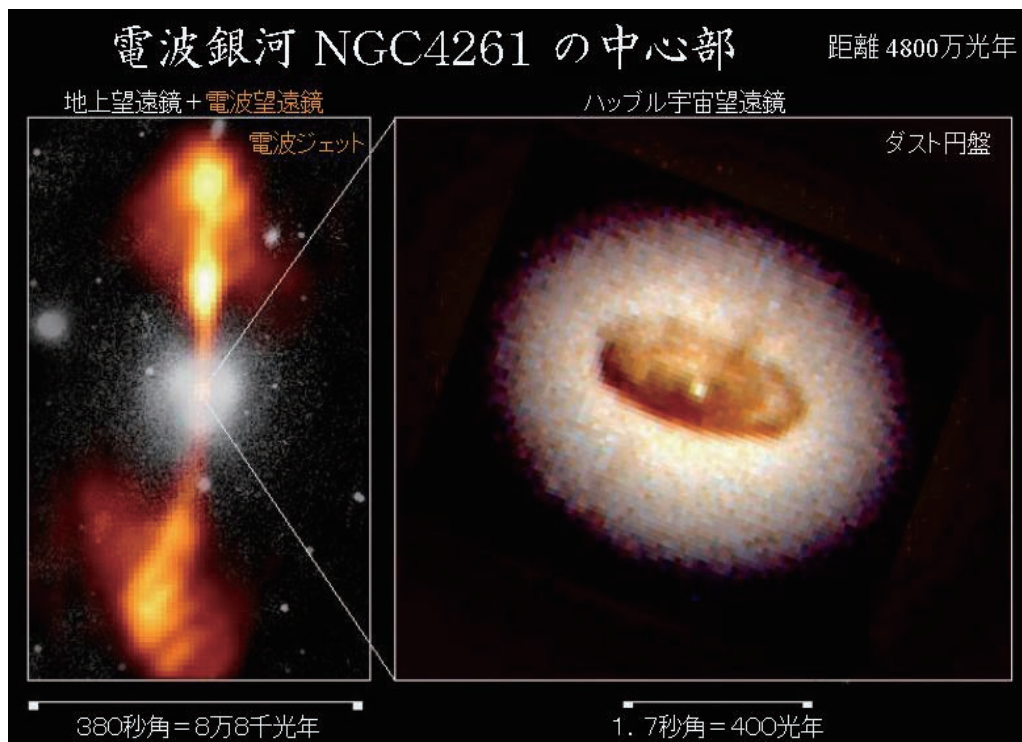


図 2.3-25 電波銀河 NGC4261 の中心部にあるダスト円盤とブラックホール
(<http://hubblesite.org> PRC95-47)

2. 3. 8. 3 クエーサー

1962 年、3C273 という電波天体の位置が月の掩蔽を利用して正確に求められました。その位置には 12.8 等級の恒星がありました。1963 年シュミットはそのスペクトルをとり、その恒星は強い輝線を出していて、しかも 0.158 と非常に大きく赤方偏移していることに気づきました。これが本当なら光速の 14.5% で遠ざかっていることになります。ハッブルの法則を使えば距離は 25 億光年となり、非常に遠い天体になります。それなのに見かけはこんなに明るいのですから、もともとは銀河全部の星を合わせたよりも 100 倍も明るい光を出しているのです。もはや恒星ではありえません。しかも 100 日程度で明るさを変えるのでその大きさは 1 光年以下ということです。他にもこのような天体が見つかり、恒星と同じく点にしか見えなくても非常に遠方にある天体という意味で準恒星状天体(Quasi Stellar Object)、略してクエーサー(Quasar)と呼ばれるようになりました。

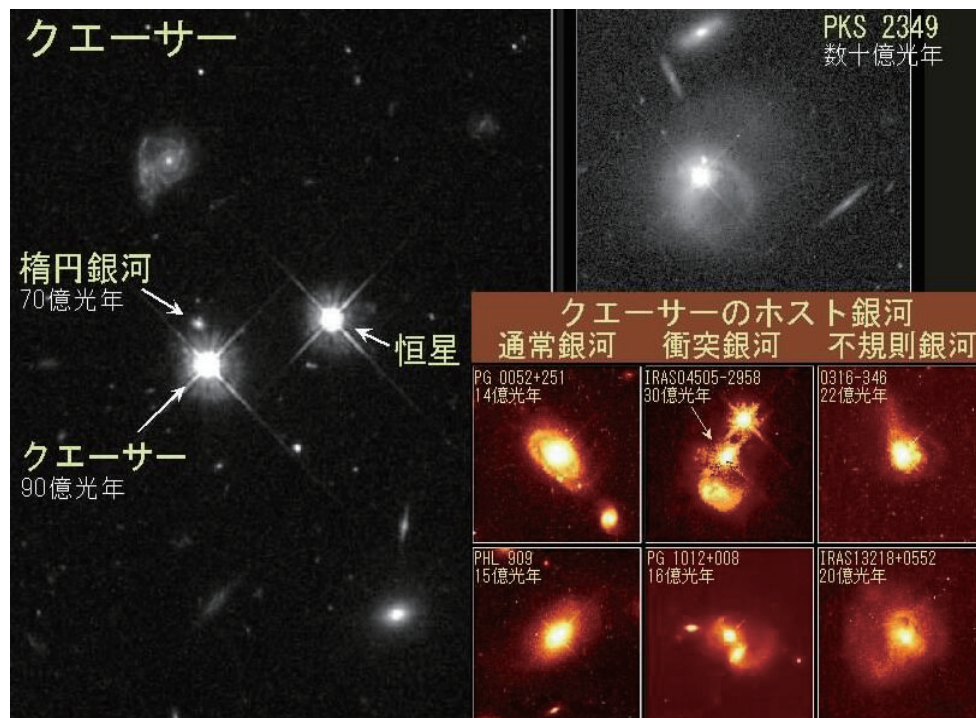


図 2.3-26 準恒星状天体(クエーサー)

(<http://hubblesite.org> PRC96-25, PRC95-35a)

図 2.3-26 に左側パネルに同じような明るさの星が 2 つありますが左側の方はクエーサーです。右の恒星はたかだか 90 光年くらいの距離なのに対し、このクエーサーは 90 億光年の彼方にあります。1 億倍も遠いのです。したがってもとの明るさは 1 億倍の 1 億倍 = 1 京倍も明るいのです。銀河系には 2000 億個の星があります。このクエーサーは銀河系全体の 5 万倍も明るいのです。クエーサーの上に微かに写っている楕円銀河と比較してください。

クエーサーは現在までに 5000 個以上、発見されています。それらは赤方偏移 0.3 から 2 の遠方に分布しています。近くにはありません。これは遠くにクエーサーが多いというより、50 億年前から 100 億年前の昔に多かったと理解されています。さらに昔にさかのぼって赤方偏移 3 以上ではクエーサーの数は減ってきます。クエーサーは宇宙ができて 30~50 億年のころに誕生し 50~100 億年のころ多く存在し、現在はほとんどない天体なのです。

クエーサーは長らく「恒星状」でしたが、望遠鏡の進歩により最近ではクエーサーの回りに微かな銀河が写るようになりました。クエーサーは銀河の中心核だったのです。銀河の種類はさまざまですが、衝突銀河も多く含まれています。

銀河の衝突・合体はたまに起こる現象で、宇宙では珍しくはありません(図 2.3-27)。銀河と銀河がぶつかると言っても、星同士はぶつかりません。星同士の間はスカスカで、東京の夏みかんとシンガポールの夏みかんの程度なので夏みかん同士がぶつかることはまずありません。しかし重力は及ぼしあうので、弾き飛ばされ銀河の形を変えます。銀河のガ

スは圧縮され星が一気に生まれます。そして一部のガスは、銀河の中心にある巨大ブラックホールに落下します。こうした銀河衝突が引き金となってクエーサー活動が起こるのだという説もあります。この合体を繰り返し巨大楕円銀河ができたという説もあります。

電波銀河やクエーサーの他にも中心核が明るい銀河があります。セイファート銀河やトカゲ座 BL 型天体です。これらの天体をまとめて活動銀河核と呼んでいます。活動的な銀河の中心という意味です。英語では Active Galactic Nuclei、略して AGN と呼ばれます。

銀河の衝突・合体

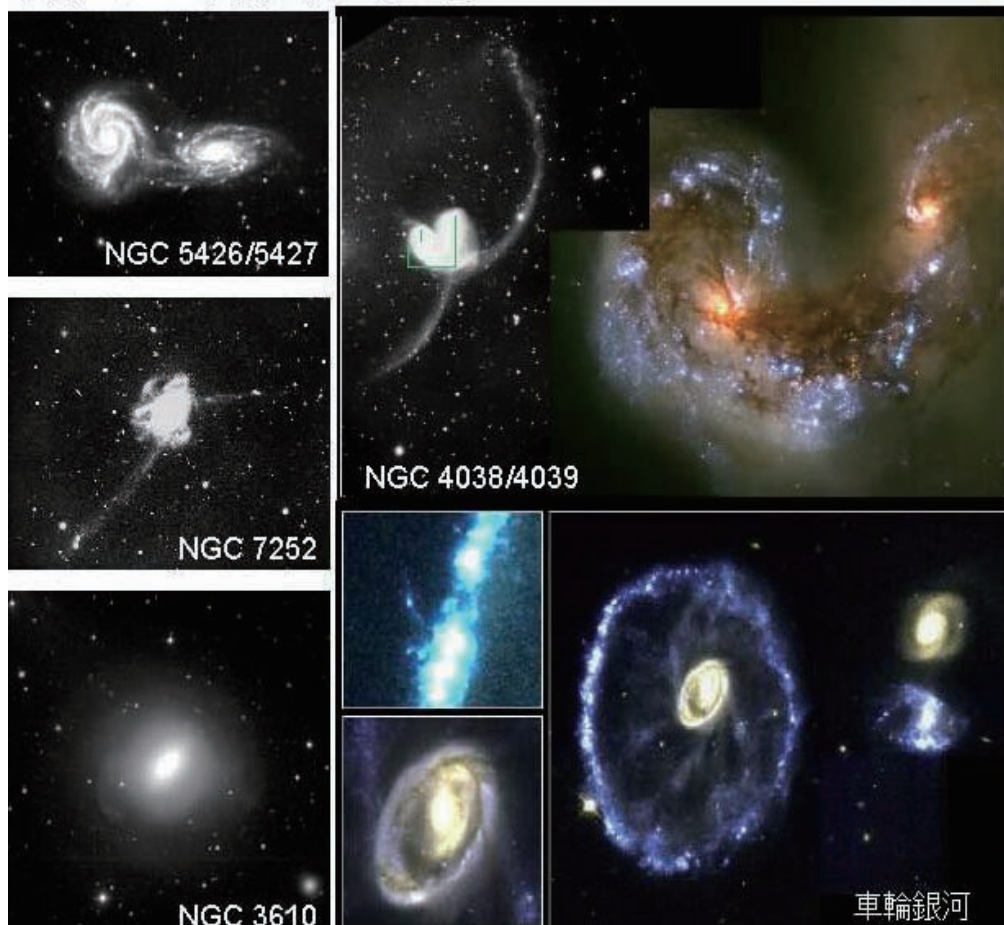


図 2.3-27 銀河の衝突・合体

(<http://hubblesite.org>, PRC97-34^a, PR95-02)

2. 3. 9 宇宙の歴史・未来

この説では宇宙が誕生してから今までの歴史、そして今後どうなるかという未来をたどてみましょう。「？」付きのところはまだ定説ではないところです。

宇宙の年表

ビッグバンから最後の暗黒時代まで 10^{170} 年にわたる宇宙の歴史。大きな目盛りごとに時間が 10 倍経過する。

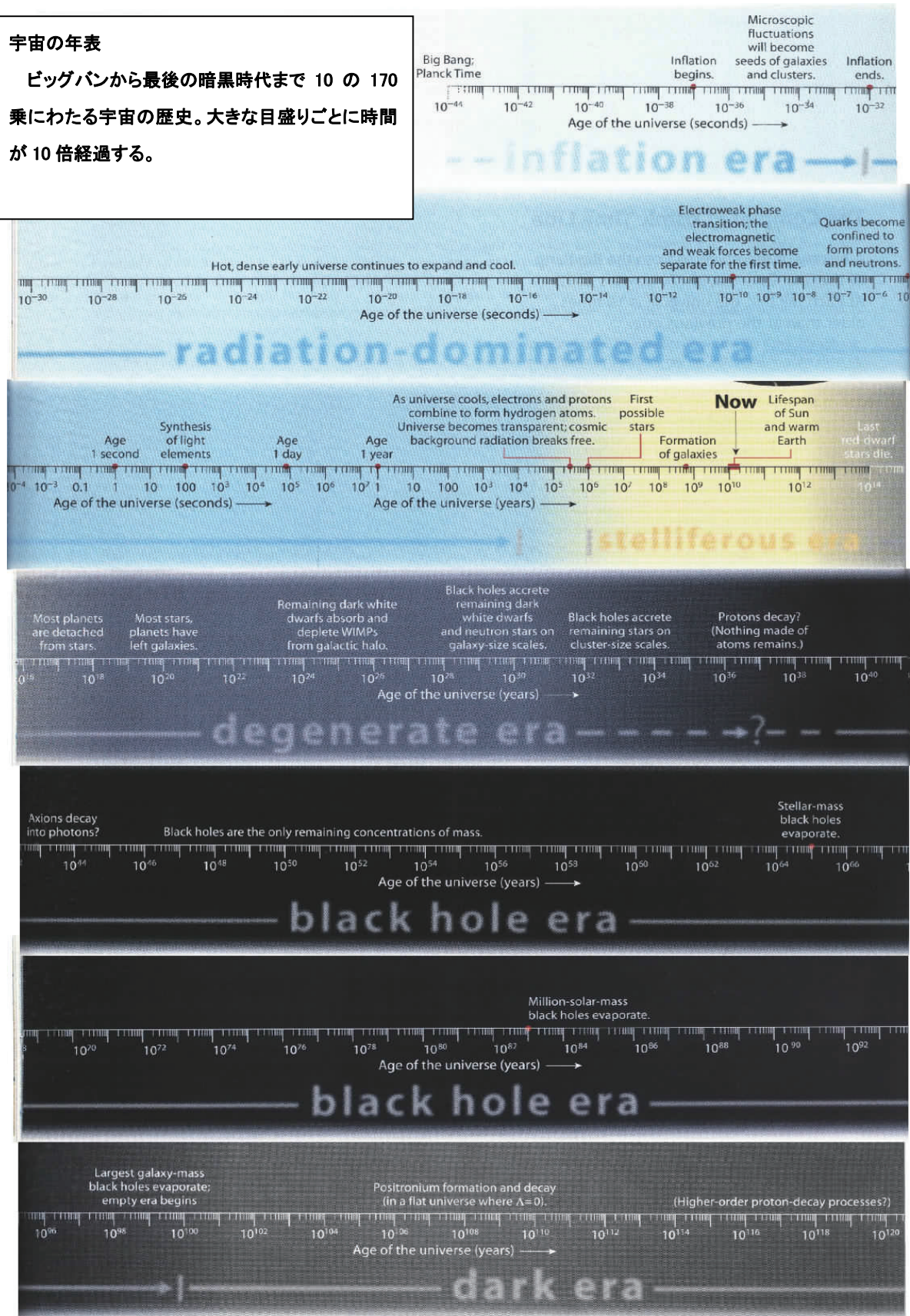


図 2.3-28 宇宙の年表(Sky & Telescope)

2. 3. 9. 1 宇宙の始まり

10 の⁻⁴³ 乗秒：プランク時間と呼ばれます。重力が分かれ「時空」が生まれた？ この時間の宇宙の大きさはあまりに小さいので、量力学のゼロ点振動が大きくなり、ゼロ点振動のエネルギーだけで時空が曲がってしまいます（ブラックホールになってしまう）。これより前では、宇宙膨張がそれ以降と同様に進んでいたとは考えられません。量子論的な宇宙論ができればこの辺のことが理解できるでしょう。宇宙の大きさは 10 の⁻³³ 乗 cm です。

10 の⁻³⁷ 乗秒：強い力が分かれた？ このときに真空のエネルギーによりインフレーションが始まった？。宇宙の大きさは 10 の⁻²⁷ 乗 cm。

10 の⁻³⁶ 乗秒：このころ X 粒子が存在し、粒子-反粒子の対称性が崩れた？

10 の⁻³³ 乗秒：インフレーション終わった？ 宇宙の大きさは本当なら 10 の⁻²³ 乗 cm だが、インフレーションのために 1cm 程度の大きさになった？ 原子核の大きさは 10 の⁻¹³ 乗 cm なので、それよりもっともっと小さかった宇宙が 10 の⁻³³ 乗秒というあっという間に光速を超えて「目に見える大きさ」まで大きくなったのです。インフレーションのエネルギーが熱に変わり、宇宙は熱い火の玉状態になりビッグバンが始まりました。

10 の⁻¹⁰ 乗秒：弱い力と電磁気力が分かれた。

10 の⁻⁶ 乗秒：クォークが陽子と中性子になった。

3 分：ヘリウムが合成された。全質量の 25%がヘリウムになった。

10 万年：自由に浮遊していた陽子と電子が合体し水素原子になった。この時の宇宙が 3K マイクロ波背景放射で見えています。すでにダークマターの大きな揺らぎはできていて、それが銀河団へと発展？

100 万年：最初の星が生まれた。以降、恒星の時代です。

6 億年：最初の銀河が生まれた。

50 億年：太陽系が生まれた。

そして現在。

2. 3. 9. 2 宇宙の未来

あと 60 億年：太陽の寿命がきます。

100 兆年：何回か星のサイクルを繰り返したあともっとも軽い星も燃え尽きます。以降は星明かりはなくなります。縮退星(白色矮星、中性子星、ブラックホール)の時代となります。

10 の 20 乗年：星は銀河から飛び出るか、中心の巨大ブラックホールに落ち込みます。

10 の 37 乗年：陽子、中性子が崩壊して光になる？ これ以降、原子でできている、人間、地球、中性子星などといったものは存在しえませんが、以降はブラックホールの時代です。

10 の 65 乗年：星質量のブラックホールが蒸発して光になります。

10 の 99 乗年：銀河中心の巨大ブラックホールが蒸発して光になります。以降は電子、陽電子、ニュートリノ、光の時代です。この時代、宇宙は途方もなくスカスカです。

2. 3. 9. 3 超ひも理論

ブラックホールとか宇宙の始まりとか、相対性理論では正しく表せない点が出てきました。これを克服する理論として「超ひも理論」があります。素粒子よりも小さなひもの振動の仕方、いろいろな素粒子や力を説明する理論です。この宇宙は4次元ですが、7次元の小さく丸まっている次元を加えて11次元の次元であるとするのが都合よく説明できるようです。この宇宙の始めのビッグバンやブラックホールの特異点などが数学上の点ではなくて、丸まっている次元の大きさという有限の大きさで止まり、特異点問題が回避されます。超ひも理論は21世紀の理論として期待は高いのですが、計算が複雑であるためその有効性や真偽のほどについては未知数です。

2. 3. 9. 4 その前は、量子宇宙

真空とは陽子－反陽子対などが生まれては消えている状態だと言いました。プランク長さ(10 の-33 乗 cm)くらいの宇宙では、時間や空間も量子的に考えなければいけないでしょう。つまり真空で生まれては消えている粒子対と同じように、「無」つまり時間も空間もないところで、時間や空間が生まれては消えているのです。宇宙とは時間と空間です。その宇宙が量子的に生まれては消えていきを繰り返しているのです。この宇宙像を量子宇宙といいます。そこで生まれたある宇宙がしばらくして突如インフレーションを起こし、1cm程度の宇宙に成長しました。ゆらぎで生まれた粒子は通常はすぐ消えるのですが、こうなると大きすぎて宇宙は消滅できません。消滅できなくなるとエネルギー保存則は守られない気がし

ますがいいのでしょうか？ いい場合があります。この宇宙の全エネルギーを足したのがゼロであれば、エネルギーゼロのものが何年存在しようが不確定関係は満足しているのです。でも我々の宇宙には物質があってエネルギーはプラスの気がします。ところが物質間の重力エネルギーがマイナスで、足し合わせるとちょうどゼロになるということです。重力ポテンシャルは無限遠でゼロで、有限距離ではマイナスの値を持ちます。そもそも無限遠でゼロというのは便宜的に決めたものですが、もしその絶対値に意味があるものならば、そういう考えもありえます。あるいは、そもそも「無」では時間の概念がないので、我々の感じている 150 億年という時間も、「無」の世界の時間とは無関係の「一瞬」で、この宇宙はエネルギー揺らぎの範囲内として許されるのでしょうか？

とにかく、こうして宇宙は始まったのです。そうしてちょうどいい時期にインフレーションが終わると、インフレーションのエネルギーは熱に変わり、熱い素粒子のスープが生まれ、そこからビッグバンが始まりました。

2. 4 現代の天体観測装置

天文学、つまり宇宙の研究には大きく分けて2つの方法があります。一つは望遠鏡で実際に宇宙を観測する方法で、もう一つは理論的な計算(高度な数学を使ったものなど)やコンピューターを用いたシミュレーションという方法です。ここでは1つ目の宇宙の観測に使う最新の装置を紹介します。

宇宙からは目に見える光のほかにも電波やX線もやってきます。観測屋はこれを望遠鏡で集めて、画像を作ったり、スペクトルをとったりします。そのためにはそれぞれに適した望遠鏡が必要です。望遠鏡は現代の最先端の科学技術を用いて設計・製作されています。天文学で観測をしてデータを得る時、いい望遠鏡を使うことでその価値が決まってしまうといってもいいかもしれません。

2. 4. 1 光や赤外線望遠鏡

2. 4. 1. 1 ケック望遠鏡

現在のところ望遠鏡の性能を決めるのは「どれだけきれいな写真がとれるか」と「どれだけ暗い天体の写真がとれるか」の2つです。そしてこのほとんどは望遠鏡に使われる鏡で決定されます。鏡は普通のカメラで言えばレンズの部分にあたります。暗い天体をみるにはたくさんの光を集める大きな鏡が、きれいな写真をとるには凹凸のないきれいな鏡が必要になります。大きさの点でかつて(十数年ほど前まで)の世界一だったのが、アメリカのパロマー山にある直径 5 メートルの鏡を用いた望遠鏡でした。パロマー天文台の望遠鏡が完成したのは 1948 年ですが、それ以後数十年間これを越える望遠鏡は作られませんでした。理由はこれ以上鏡を大きくしても、鏡が自分の重さで歪んでしまうのできれいな天体写真がとれなくなってしまうのです。この直径8メートルの壁を最初に突き破ったのがケック望遠鏡です(図 2.4-1)。方法は単純です。大きな鏡を六角形の小さな鏡に分割したのです。ただし小さいといっても1つは直径が 1.8 メートルあります(図 2.4-2)。これを 36 枚あわせて口径 10mに相当する巨大な望遠鏡が完成しました。ケック望遠鏡はハワイのマウナケア山頂に2台あり、干渉計としての利用も進められています。



図 2.4-1 ケック望遠鏡

(<http://www.ifa.hawaii.edu/images/aerial-tour/kecks.html>)



図 2.4-2 ケック望遠鏡の10メートル鏡を構成する小ミラー

(<http://home.wi.rr.com/astrophotography/scene%208.9.htm>)

2. 4. 1. 2 すばる望遠鏡

ケック望遠鏡は分割することで大きな鏡を実現しましたが、鏡と鏡のつなぎ目がたくさんあり、どうしても画像がきれいになりませんでした。きれいな画像を得るにはやはり大きくて1枚の鏡が必要なのです。この「一枚で大きな鏡」を最初に実現したのが日本のすばる望遠鏡です(図 2.4-3)。すばる望遠鏡は、やはりハワイ島のマウナケア山頂にあり、ケック望遠鏡のお隣さんです。鏡は直径が 8.2mもあります。この鏡がまさにすばるの心臓部です。鏡といっても簡単にいってしまえばガラスの塊ですが、特殊なガラスを用いて最新の技術で作られています。鏡の材料となるガラスの塊を作るのに3年、これを加工して磨くのさらに4年も費やしました。鏡は薄くはしましたが、それでも重さは20トン以上あります。また鏡をハワイマウナケア山頂へ運ぶのも一苦労です。こうして望遠鏡のドームに収まった鏡は、さらにアクチュエーターと呼ばれるハイテク装置でコントロールされ、鏡をどんな向きにおいても常に一定の形に保ち、きれいな画像をとらえる様になっています。

すばるは鏡で集めた光を記録する装置(市販のカメラでフィルムに相当)の種類が多いのも特徴です。広い視野をカバーするものや、赤外線が得意なもの、スペクトルをとるのが得意なものなど目的にあわせて使えるよう様になってます。図 2.4-4 は完成直後にすばるの近赤外線(目に見える光に近い赤外線)撮影装置でとらえられたオリオン座付近の写真です(9枚の写真をつなぎ合わせています)。新しい星が生まれる現場です。たくさんの星に加えて、中央の明るい星が出す紫外線の影響で全体が青白く輝いています。一般的に望遠鏡での観測は科学者ならだれでも観測提案を出せますが、競争になります。



図 2.4-3 すばる望遠鏡

(http://SubaruTelescope.org/photo/dome_tele2_300.jpg)



図 2.4-4 すばるで見たオリオン星雲

(http://subarutelescope.org/Science/press_release/1999/01/Orion_300.jpg)

2. 4. 1. 3 VLT 望遠鏡

ケックやすばる望遠鏡のあるハワイは北半球にあります。北半球からは北極星がいつでもみえますが(もちろん晴れた夜だけですが)、逆に南極の真上の空はどう頑張っても見えません。つまりハワイにどんなにいい望遠鏡をおいても絶対に見えない星があるのです。これでは宇宙をくまなく詳細に調査することはできません。よって南半球にも性能のいい望遠鏡をおく必要があります。とくに天の川(われわれ太陽系のいる銀河系)の中心方向(いて座の方向)には星がたくさんあり、これは南半球からの方がよく見えます。

北半球ではハワイ島のマウナケア山に大型望遠鏡が集中しています。これに対し南半球では南アメリカ大陸チリ共和国のアンデス山中がそのメッカです。その中の一つに VLT(Very Large Telescope)と呼ばれる望遠鏡群があります。「群」と書いたことから想像できるかもしれませんが、これは同じ型の望遠鏡を4つも並べてたくさんの光を集め、ひときわ暗い星や銀河を観測できるようになっています(図 2.4-5)。1つだけでもすばるとほぼ同じの口径 8 メートルの鏡を使っています。4つで同じ天体を観測すれば世界最大の望遠鏡と

いえるでしょう。また4つの望遠鏡を1つの大きな望遠鏡として使う(干渉計として使う)ことも可能で、すでに試験観測が始まっています。VLT はヨーロッパ連合の天文台です。



図 2.4-5 VLT

(<http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-1999/phot-43a-99-preview.jpg>)

2. 4. 1. 4 ジェミニ望遠鏡

宇宙からの光を集める望遠鏡とそれを記録する装置にはそれぞれ「個性」があります。それぞれ得意、不得意があるといってもいいでしょう。同じ望遠鏡と装置で全天を観測するために北半球と南半球の両方に1台ずつ望遠鏡を作ったのがジェミニです。まさにジェミニ(=双子)です(図 2.4-6)。北はハワイ島のマウナケア山頂に、南はチリのアンデス山中にあります。同じ装置で観測すれば得られたデータの比較が飛躍的に簡単になります。この望遠鏡の製作、運営には7つの国(アメリカ、イギリス、カナダ、オーストラリア、ブラジル、アルゼンチン、チリ)が共同で行っています。ジェミニの主鏡もすばると同じように1枚のガラスで製作されています。

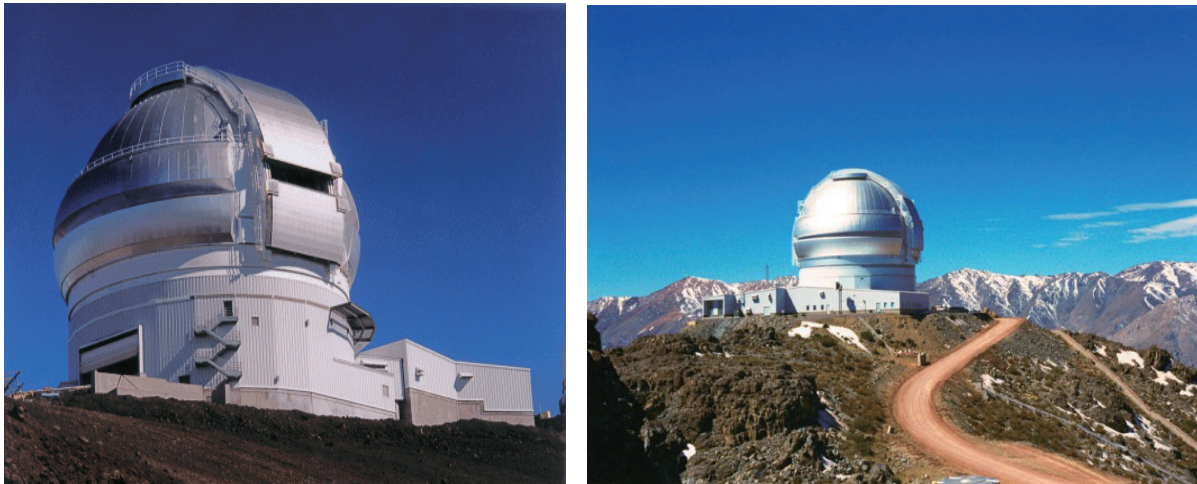


図 2.4-6 ジェミニ自身の写真(左写真:ジェミニ北、右写真:ジェミニ南)

北

http://www.gemini.edu/index.php?set_albumName=enclosures_mauna_kea&id=2409_G&option=com_gallery&Itemid=39&include=view_photo.php

南

http://www.gemini.edu/index.php?set_albumName=enclosures_cerro_pachon&id=GSSnow&option=com_gallery&Itemid=39&include=view_photo.php

2. 4. 1. 5 ハッブル望遠鏡

これまで紹介した4つの望遠鏡は標高 3000 メートルを超える高い山の頂にあります。地球の大気の影響をできるだけ避けるためです。といっても高い山の上でもやはり地球の大気は存在します。薄いとはいっても大気は邪魔な物でしかありません。この邪魔者さえなければもっときれいな天体写真が撮れるはずですよ。ではどうすればいいのでしょうか？答えは単純です。宇宙へ行けばいいのです。宇宙へ行くと雨の心配がないですし、昼でも観測が可能です。それを実現したのがアメリカのハッブル宇宙望遠鏡です。さすがに宇宙にはすばるクラスの巨大な鏡を持っていくわけには行かず、ハッブルの鏡の直径は2メートル程度です。とはいっても日本国内での最大の望遠鏡とほぼ同じサイズで、暗い天体も十分観測できます。図 2.4-7 は宇宙を飛ぶハッブルの写真です。



図 2.4-7 ハッブル望遠鏡

(http://hubblesite.org/gallery/spacecraft/06/full.jpg)

ハッブルは1991年にスペースシャトルで打ち上げられました。1980年代のシャトルの事故が無ければもっと早く打ち上げられていたはずで、世界中の天文学者が待ちに待ったものでした。しかし意外なことが起こりました。写真をとってみると期待通りの写真がえられません。何度調整しても写真はピンぼけでした。鏡が設計通りでなかったのです。地上の望遠鏡に比べると悪くはないのですが、世界中の天文学者はがっかりしました。通常の衛星は打ち上げたら最後、修理ができないものです。ハッブルは宇宙の高価な役立たずになるどころでした。しかしハッブルは特別でした。最初からスペースシャトルを用いた修理や装置交換が可能な設計になっていたのです。新たにシャトルに乗った宇宙飛行士がピンぼけを修正する「コンタクトレンズ」を装着することでハッブルは見違えるように性能を回復し、これまでに誰も見たことがないすばらしい宇宙の姿をとらえられるようになりました。画像の美しさという点では、すばるなどの地上の望遠鏡を上回り、現在でもたくさんのデータをとり続けています。また定期的にスペースシャトルでの修理やカメラの交換が行われてきました。

2. 4. 1. 6 スローンデジタルスカイサーベイ(SDSS)

この章では望遠鏡というよりはある一つのプロジェクトを紹介しましょう。スローンデジタルスカイサーベイ、略してSDSSといいます。宇宙はとてつもなく広いです。広いのですべてを一度に観測することはできません。空全体は見た目でおおよそ満月4万個分でカバーできます。しかしハッブルやすばるの標準的な装置では満月の1/1000くらい大きさしか観測できません。しかもその狭い範囲にある暗い星や銀河を観測するには何時間も望遠鏡を向ける必要があります。つまりこういった望遠鏡は宇宙のほんのわずかな部分だけ観測してるのです。宇宙には観測されてない天体がたくさんあるのです。SDSSはこれとは対称的

に天空のすべての部分を観測しようという計画です。すばるやハッブルが「狭く深く」にたいしてSDSSは「広く浅く」を目指します。SDSSは専用の望遠鏡を使います(図2.4-8)この様な計画はこれまでもありましたが、SDSSが格段に規模が大きいものです。またSDSSは画像をとるだけでなく自分自身で撮影した明るい銀河に関してはスペクトルをとることでその距離も測定します。つまり単なる写真集でなく奥行き構造も決定し、これにより銀河の分布を示す宇宙の立体地図が完成します。これは宇宙の進化を知る上で非常に重要な情報になります。また「宇宙で最も遠い天体」はこのSDSSで発見された例が多く、現在でも発見は続いています。

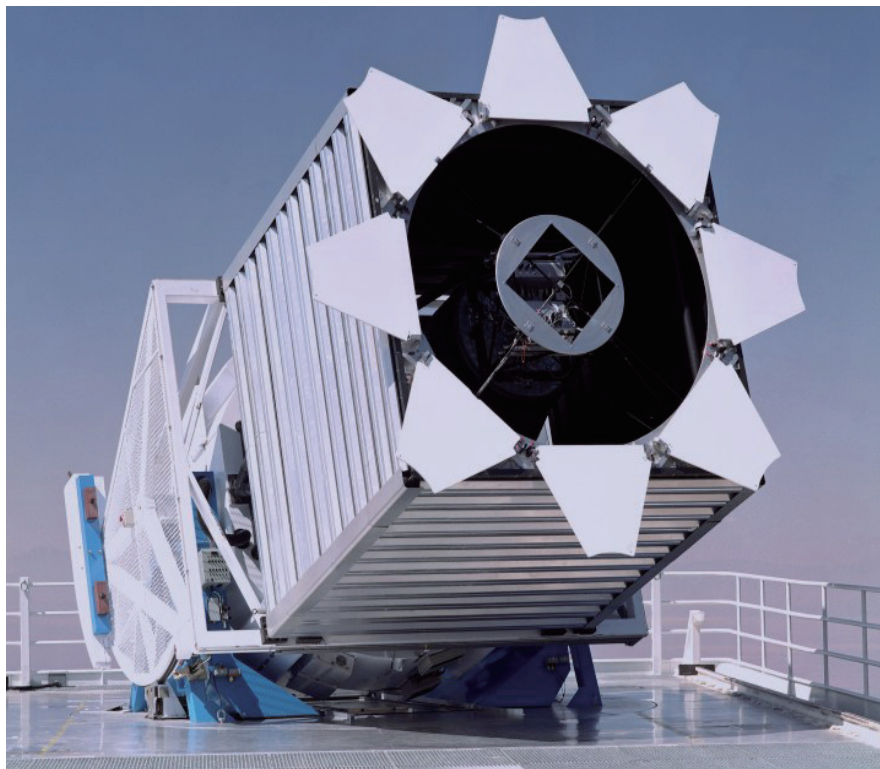


図 2.4-8 SDSS 自身の望遠鏡の写真
(http://www.sdss.org/photos/00_427.72dpi.jpg)

2. 4. 2 X線の天文台

X線は地球の大気で吸収されてしまうので地上からは観測できません。通常は衛星をつかって宇宙から観測を行います。最近のX線天文衛星をいくつか紹介しましょう。

2. 4. 2. 1 あすか衛星

あすかは 1993 年に日本が中心となって打ち上げられたX線天文衛星です(図 2.4-9)。あすかはスペクトル機能(色を見分ける能力)に優れているのが特徴で同時に画像を取ることができます。あすかは超新星残骸が宇宙線の起源である証拠や活動銀河核中心付近の強い重力の証拠を発見したり、「重い」元素の宇宙での分布を観測するなど数々の業績を残し、2000 年に運用を終了しました。

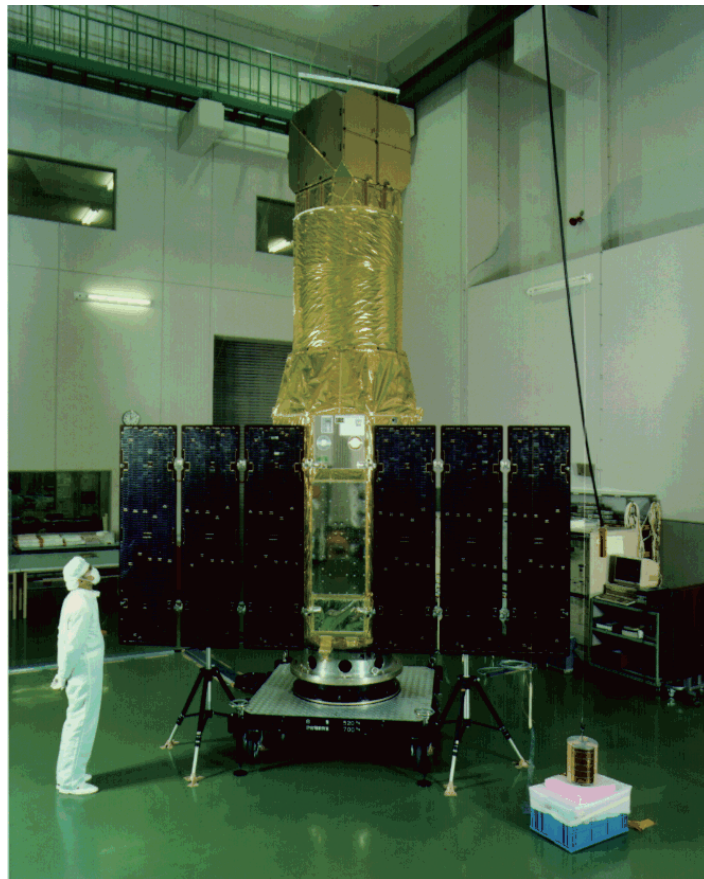


図 2.4-9 あすか衛星

(<http://www.astro.isas.ac.jp/asca/news/article/1993/0220/astrod2.png>)

2. 4. 2. 2 すざく衛星

X線の領域は日本の貢献が大きい分野です。しかし2000年から2005年にかけて日本はX線天文衛星を持っていませんでした。チャンドラ XMM-ニュートン衛星と並び世界のX線三大望遠鏡時代を形成するはずであった日本の計画(ASTRO-E 衛星計画)は2000年2月ロケットの打ち上げが成功せず失敗に終わりました。筆者もこの計画に携わっていたので非常に残念でした。その後、日本のX線天文チームは後継機 Astro-EII を開発し、2005年7月の打ち上げ成功後「すざく衛星」と命名しました(図 2.4-10)。3種類の観測装置のうちの1つであるX線微少熱量計は冷却用液体ヘリウムの喪失により使用できなくなりましたが、残り2つの観測装置(X線 CCD カメラと硬 X 線検出器)を使って研究が始まったところです。このミッションの特徴は、さまざまな X 線天体について、これまでできなかった広いエネルギー範囲(0.3~600keV)にわたり高い感度で多くの観測研究を行なうことです。エックス線・ガンマ線による高温プラズマの研究、宇宙の構造と進化の研究、ブラックホール候補天体と活動銀河核の広帯域のスペクトル研究などが主な目的です。



図 2.4-10 すざく衛星

(http://spaceinfo.jaxa.jp/note/eisei/j/eis_astoroe2_j.html)

2. 4. 2. 3 チャンドラ衛星

チャンドラ衛星(図 2.4-11)は米国が中心になって 1999 年にスペースシャトルで打ち上げられました。チャンドラは図体が非常に大きく、スペースシャトルで運んだ史上最大級のペイロード(荷物)です。チャンドラはシャープな画像を取得するのを得意としています。ハッブル望遠鏡のX線版といえるでしょう。あすか衛星に比べれば100倍以上もシャープな画像が得られます。チャンドラという愛称は天体物理学の業績でノーベル賞を受賞したチャンドラセカール氏にちなんでつけられました。



図 2.4-11 チャンドラ衛星

(<http://chandra.harvard.edu/graphics/resources/illustrations/craftPoster-225.jpg>)

2. 4. 2. 4 XMM-ニュートン衛星

XMM 衛星(図 2.4-12)は 2000 年にヨーロッパ諸国により共同で打ち上げられました。この望遠鏡の特徴は鏡の大きさです。面積はあすかやチャンドラの 10 倍近くあります。つまり暗い天体の観測、特にスペクトルをとるのを得意としています。画像の美しさではチャンドラに負けますが、それでもあすかの 10 倍優れています。XMM はニュートンという愛称がつけられており、17 世紀に重力を発見したアイザックニュートンにちなんでつけられました。

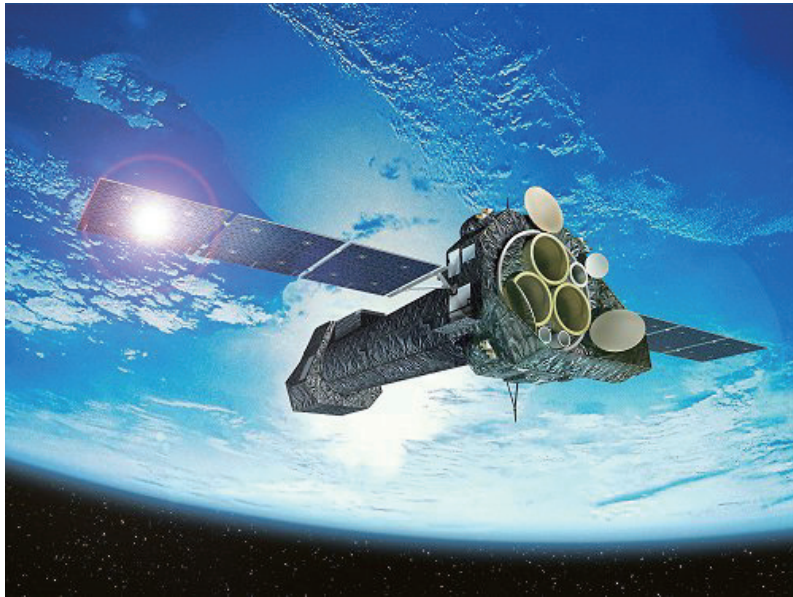


図 2.4-12 XMM-ニュートン衛星

(http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/xmm/xmmhp_gallery.html)

2. 4. 3 スーパーカミオカンデ

最先端の天文学は、もはや光や電波、X線といった「電磁波」の世界にとどまりません。電磁波以外の全く新しい情報も活用しようとしています。たとえばニュートリノや重力波、宇宙線などがあげられます。その中の例として、ニュートリノを紹介しましょう。ニュートリノとは電子や光子の様な「素粒子」の一種で幽霊の様な性質を持っています。幽霊というのはなかなか捕まえないということです。ニュートリノが一発来ても、地球を簡単に通過してしまいます。ではそんな幽霊粒子をどうやって観測するのでしょうか。それはニュートリノの数が多いことで解決されます。地球を通り抜けるといっても、たまには最初の 1 メートルで止まってしまうニュートリノもあるでしょう。数が多いのでこの運の悪かった奴だけを確実にとらえればいいのです。ただ飛んでくる数が多いといっても実際に捕まえられるのは1日観測しても数個程度です。実に地道な観測が必要です。そのニュートリノの世界最高の施設が日本の岐阜県の神岡鉱山跡にあり、カミオカンデと呼ばれています。雑音となる宇宙線が届かない地下 1000 メートルに作られました。高い山の頂上に作られる普通の望遠鏡とは大違いですね。カミオカンデは1987年に起きた超新星爆発からのニュートリノを検出して一躍その名を世界にとどろかせました。現在はそれをスケールアップしたスーパーカミオカンデが活躍しています。スーパーカミオカンデは天文だけでなく素粒子物理の分野でも大活躍しています。たとえばニュートリノの質量を発見するというノーベル賞級の成果を残しました。スーパーカミオカンデで日本は世界でニュートリノ研究の最先端にいるといえるでしょう。

スーパーカミオカンデにおいて望遠鏡の鏡に相当するのは純水です。水がたくさんある

ほどたくさんのニュートリノをとらえられます。図 2.4-13 はスーパーカミオカンデの巨大な水タンクの内部です。水タンクの内部でニュートリノをとらえると、その地点から高速の電子が飛び出てきます。水の中では光の速度は真空中に比べ遅くなりますが、飛び出した電子の速度はこの遅くなった光の速度を超えています。すると電子はチェレンコフ光という青い光を発し、水タンクの壁についた超好感度光センサーがこれをとらえます。この光センサーがスーパーカミオカンデの特徴でもあります。

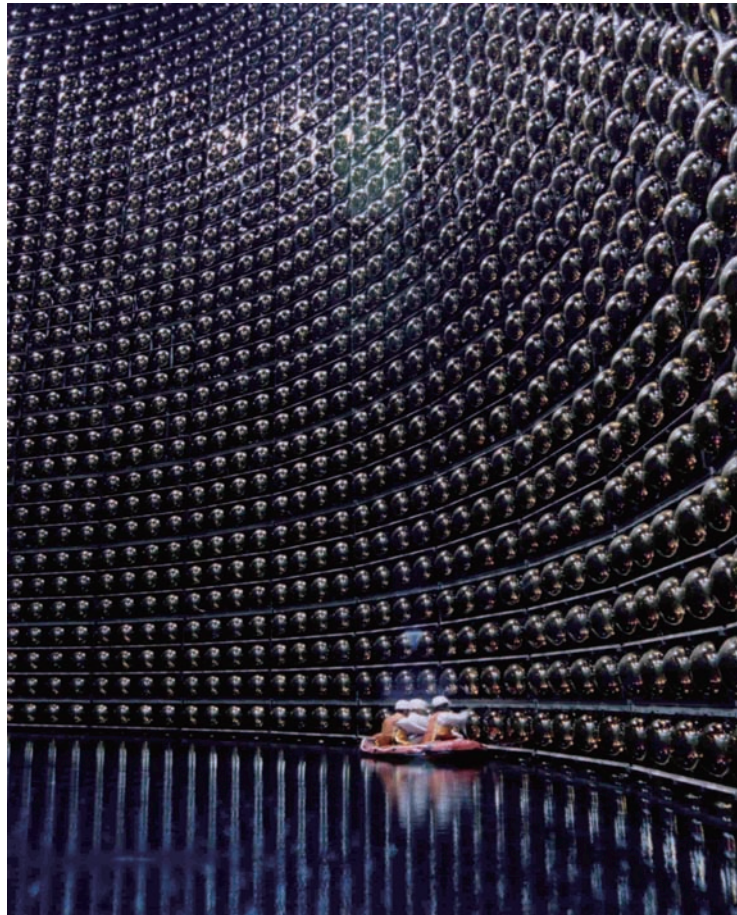


図 2.4-13 スーパーカミオカンデの巨大な水タンクの内部
(http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/photo/sk_04.jpg)

2. 4. 4 天体観測の将来計画

これまで紹介したのは現在活躍中の天文台です。次に将来計画の例をいくつか紹介しましょう。

2. 4. 4. 1 NeXT 衛星計画

NeXT 衛星は 2010 年代初頭の打上げを目指して、日本を中心に検討・開発されている次世代の X 線天文衛星で(図 2.4-14)、すざく衛星の後継機にあたります。NeXT (Non-thermal energy eXploration Telescope)はこれまでの X 線天文衛星よりも 1 桁高いエネルギーの光子まで、高い感度での観測を初めて実現します。これにより NeXT は分厚いガス雲の向こうに隠れて見えなかった巨大ブラックホールなどを探る、世界で最も透視力の優れた天文台となります。それをささえる新技術の「硬 X 線対応型 X 線ミラー」です。これまでの X 線天文衛星の望遠鏡にとって技術的限界であった 10 キロ電子ボルトというエネルギーを超え、80 キロ電子ボルトまでの X 線を集めることができ、10-80 キロ電子ボルトの帯域での感度が 2 桁も向上します。また、すざく衛星では冷却用液体ヘリウムの蒸発のため実観測に使用できなかった X 線微少熱量計も搭載され、極めて高い感度で宇宙のプラズマの性質を探ります。

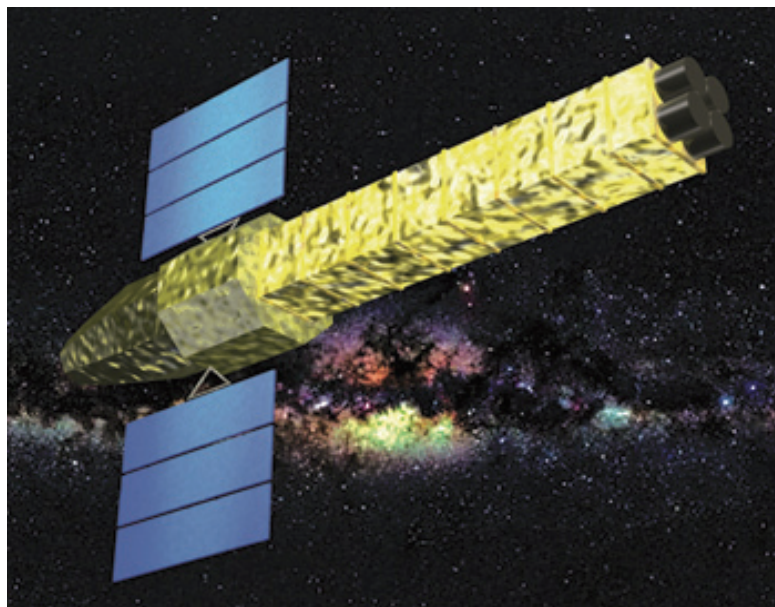


図 2.4-14 NeXT 衛星の想像図

(<http://www.isas.jaxa.jp/j/special/2005/plan/01.shtml>)

2. 4. 4. 2 ASTRO-F (別名 IRIS: Infrared Imaging Surveyor) 計画

ASTRO-F は、2006年2月に日本が打ち上げた赤外線天文衛星です。ASTRO-F はハッブル望遠鏡やすばる望遠鏡のように個々の天体を詳しく観測する機能に加え、SDSS のように宇宙全体を隙間無く観測するサーベイ機能があります。これまで赤外線で全天サーベイした IRAS (Infrared Astronomical Satellite) という衛星にくらべ格段にきれいな画像がとれます。ASTRO-F は遠方天体の赤方偏移した光や、比較的定温の天体の出す光の観測に適しています。非常に遠くにある、つまり生まれたばかりの銀河や星の姿をとらえたり、赤外線でとりわけ明るい特殊な銀河を観測します。

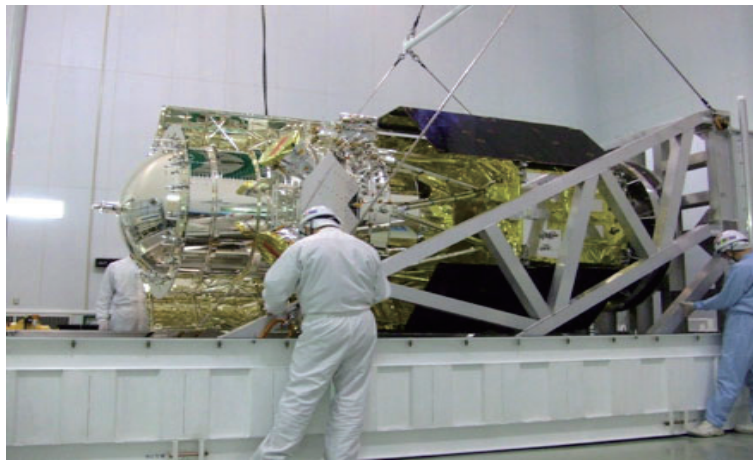


図 2.4-15 ASTRO-F 衛星(打ち上げが行われる鹿児島県の内之浦宇宙空間観測所でコンテナから取り出されるところ)

(<http://www.ir.isas.ac.jp/ASTRO-F/Outreach/index.html>)

2. 4. 4. 3 全天 X 線監視装置 MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) 計画

X線はブラックホールや中性子星の観測を得意としていますが、こういった星はバーストやノバと呼ばれる現象を起こしX線で急激に明るくなることがあります。明るくなると地上の光、電波の望遠鏡や他のX線の望遠鏡で観測すればブラックホールなどの研究がよりいっそう進みます。こういった現象をいつどこで起こるかわからないので、全天を常に監視し、突発現象を発見するとインターネットを使い全世界へ通報するというちょっと変わった天文学があります。モニター天文学といいます。このモニター天文学を現在建設中の国際宇宙ステーションから行う計画があります。日本がすすめている全天 X 線監視装置(MAXI)計画といいます。MAXI はこれまでのモニター天文ミッションにくらべて 10 倍高い感度の観測ができます。銀河系の外の巨大ブラックホールも監視可能で、観測開始予定の2009年頃から新しいデータを世界へ次々に配信することでしょう。

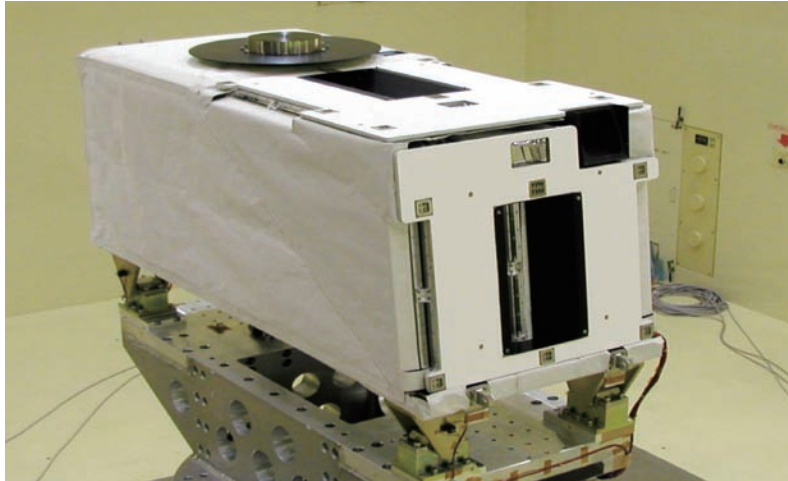


図 2.4-16 全天 X 線監視装置 MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image)

実際に打ち上げられる Flight Model は現在製作中です。この写真は外見、寸法は Flight Model とほとんど一緒の Thermal Mechanical Model です。

2. 4. 4. 4 James Webb Space Telescope (旧名 : Next Generation Space Telescope)

光や赤外線で綺麗でシャープな画像を得るにはハッブル望遠鏡の様に地球大気のゆらぎに邪魔されない宇宙へ行けば有利ですが、地上の大きな望遠鏡を使えば集光力で特をするので一長一短です。これを解決するのが James Webb Space Telescope 計画です(図 2.4-17)。6メートルクラスの望遠鏡を宇宙へ持っていきます。アメリカとヨーロッパが共同で計画しています。しかし口でいうのは簡単ですが、実際に開発するのは大変です。技術的に解決すべき問題点がたくさんあり、実現するにはあと10年以上はかかるでしょう。実現すれば宇宙で最初に誕生した銀河などが見え、宇宙の歴史をクリアに解き明かしてくれるでしょう。

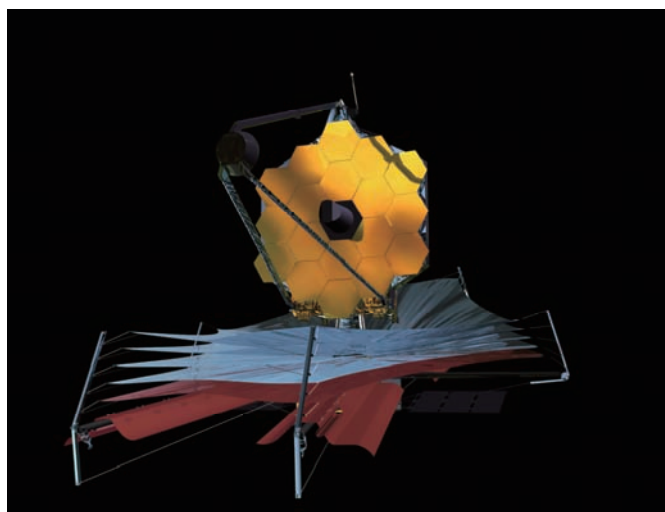


図 2.4-17 James Webb Space Telescope の想像図
(<http://www.stsci.edu/jwst/overview/gallery.html>)

2. 4. 4. 5 アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 ALMA 計画

光の波長をのばすと赤外線になり、さらにのばすと電波になります。この電波の中でも赤外線に近い波長領域は技術的な難しさからこれまであまり観測が進みませんでした。この波長領域は星の誕生や宇宙初期の銀河の生まれる現場をとらえるのに最適で、天文学最後の未踏領域です。これにチャレンジするのが ALMA(Atacama Large Millimeter submillimeter Array)計画です。南米チリのアンデス山脈山中の高度 5000mの砂漠地帯にたくさんの電波望遠鏡を並べます(図 2.4-18)。複数の望遠鏡を並べるので干渉計として使えます。完成すればハッブル望遠鏡よりも10倍シャープな天体画像をとることができます。この計画もたくさんの新技術、予算が必要なため日本、アメリカ、ヨーロッパの三者共同で開発を行っていますが、2012年には本格的な観測を開始する予定です。

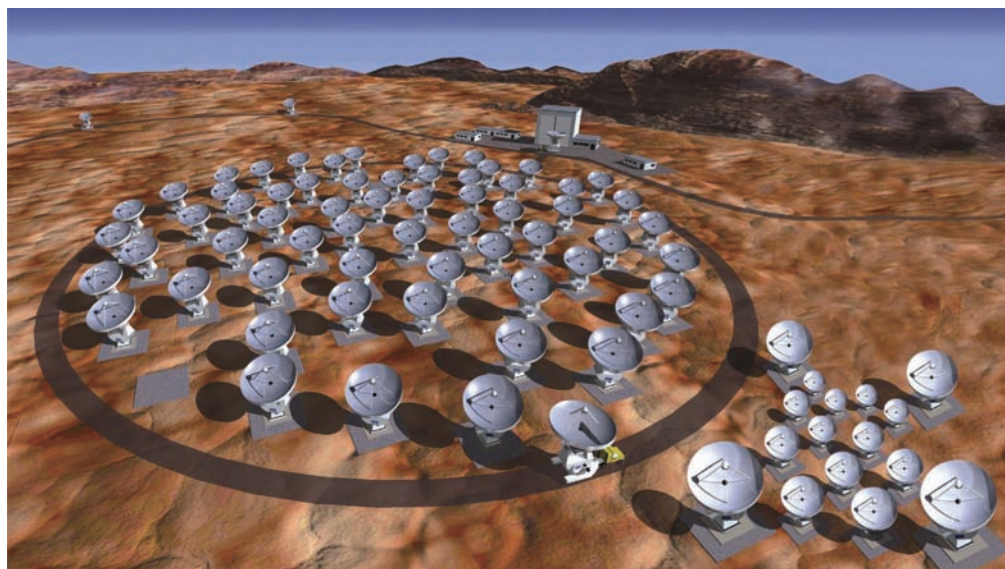


図 2.4-18 ALMA の完成予想図

(http://www.nro.nao.ac.jp/~lmsa/about/1_hajime.html のパンフレットより)

2. 4. 4. 6 大型 X 線天文衛星 XEUS

X線で考えられている大型衛星の1つの XEUS 計画を紹介しましょう。これはまさにX線で「宇宙の果て」を見るものです。これまでにくらべて 10-100 倍暗い天体を観測します。そのためには巨大な望遠鏡を宇宙に持っていく必要があります。ミラーが大きくなるとX線を集める鏡の部分と集めたX線を記録するカメラの間に相当距離をとらなくてはなりません。そのため「望遠鏡衛星」と「カメラ衛星」の2つに分けて編隊飛行しながら宇宙を観測するという野心的な計画になっています。まだ計画段階ですが、実現すればまさに神(XEUS=ゼウス:ギリシャ神話での全能の神)の様に能力を発揮することでしょう。

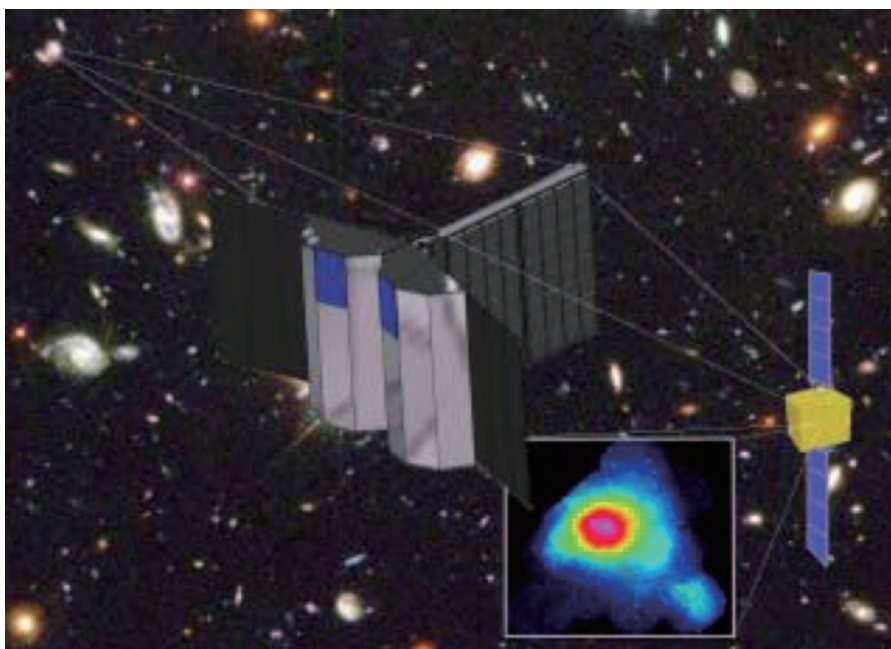


図 2.4-19 XEUS の完成予想図(中央にあるのが望遠鏡衛星、左はしがカメラ衛星)
(<http://www.rssd.esa.int/index.php?project=XEUS&page=technology>)

2. 5 現代天文学のトピック

この節では現代の天文学、宇宙物理学のトピックの例をいくつか紹介しましょう。

2. 5. 1 星の誕生

星にも一生があることはすでに述べました。ここでは星の誕生する現場をみてみましょう。星の材料はガス(気体)です。ガスがたくさんあるところで星はたくさん生まれます。ガスのたくさんある領域は天文学では分子雲と呼ばれています。しかしこの分子雲は観測する我々からみればとてもやっかいです。ガスそのものが邪魔になって星の誕生の現場がなかなか観測できないからです。地球からでも雲がでてしていると星が見えないのと同じです。地球の場合は高い山へ行くか、ハッブル望遠鏡のように宇宙へ行けば解決できますが、遠く離れた場所にあるガスはどうすればいいのでしょうか？これには厚いガスを突き抜ける光で観測します。その光が電波や赤外線やX線です。図 2.5-1 は分子雲の写真です。電波では分子雲そのものの分布が分かります。我々の目で見える光(可視光)では分子雲の濃い部分は真っ暗ですが、X線でみるとガスの一番濃い部分、つまり星の材料がたくさんある部分に明るい星が見えます。まさに星の生まれる現場です。またX線を発していることから生まれたばかりの星もなんらかの激しい活動性をもっていることがわかります。太陽フレアより大規模な磁気現象が生まれたばかりの星の表面でおこっていて、そこで加熱されたガスからX線がでると考えられています。

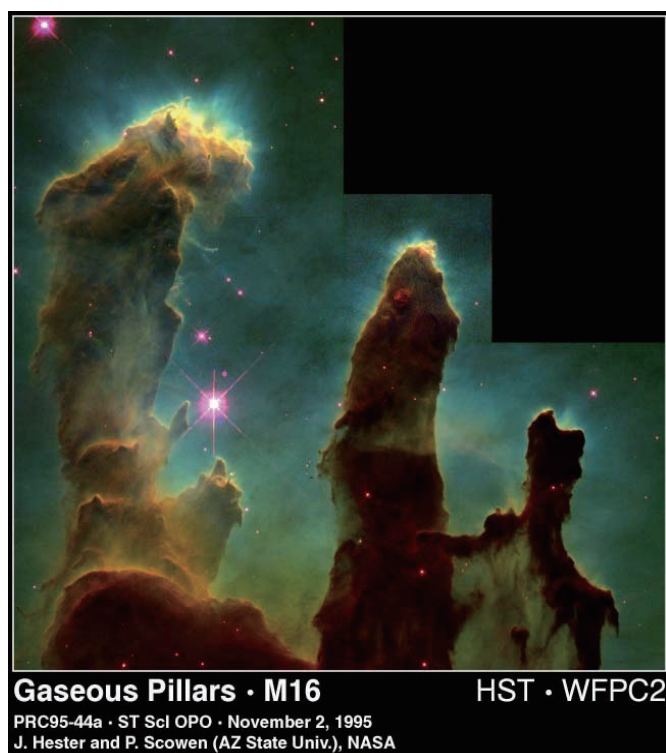


図 2.5-1 星の誕生現場である分子雲の写真(ハッブル望遠鏡でみたワシ星雲)
(<http://hubblesite.org/newscenter/newsdesk/archive/releases/1995/44/>)

2. 5. 2 宇宙でもっとも遠い天体

天文学者は遠い銀河までの距離を赤方偏移と言う数値で表します。 z という記号を使います。 z が大きいほど遠くてもうれつなスピードで遠ざかっていることを示します。銀河までの距離が遠いほど、我々に光がとどくのにかかります。よって z が大きいほど昔発せられた光をみていることになります。現在もっとも z が大きいのは宇宙背景放射と呼ばれるもので $z=1000$ くらい(約 137 億年前、宇宙誕生からだ約 30 万年後に相当)で、電波で観測されています。宇宙背景放射は銀河や星ではありません。宇宙のどの方向からもやってくる雑音のようなものです。 $z=1000$ ほどの遠方になると、そこで出た光は我々に届くまで、ほぼ宇宙の年齢とおなじだけ時間がかかります。また我々に届くまでの間に光の波長が約 1000 倍引きのばされて電波として観測されるわけです。宇宙背景放射が放射されたばかりのころ、つまり宇宙初期には、まだ星も銀河もできていず、宇宙は数千度の熱いガスだけの世界でした。この熱いガスが出す光がドップラー効果によって電波の領域で観測されたのが宇宙背景放射です。この電波は驚くほど一様で明るさのばらつきは 0.01% ありません。このことから、放射源であるガスも、初期の宇宙では非常に一様に分布しており、ほんのわずかな揺らぎが成長して星や銀河ができたと考えられています。

では宇宙背景放射の次に遠い天体は何でしょうか。それはクエーサーと呼ばれる明るい天体です。例を図 2.5-2 に示します。クエーサーは遠い銀河の中心にある巨大なブラックホールと考えられています。しかしすべての銀河にあるわけではなく、私たちから近い銀河にはほとんど発見されていません。つまり遠い天体、昔の天体にしか無いものです。現在のところ最も遠いクエーサーは $z=6$ 程度です、つまり $z=6$ (約 130 億年前、宇宙が誕生してから約 8 億年)の世界ではすでに銀河や星ができていたことになります。

クエーサーは $z=6$ 程度、宇宙背景放射は $z=1000$ です。 $z=6\sim 1000$ の間は今のところ誰も観測したことはありません。が、生まれたての星や銀河が存在するはずの領域です。現在多くの天文学者がこの領域をねらって研究をしています。この誰も見たことのない「昔」を観測する方法(天体)が最近現れました。ガンマ線バーストです。ガンマ線バーストは次の章で詳しく述べましょう。

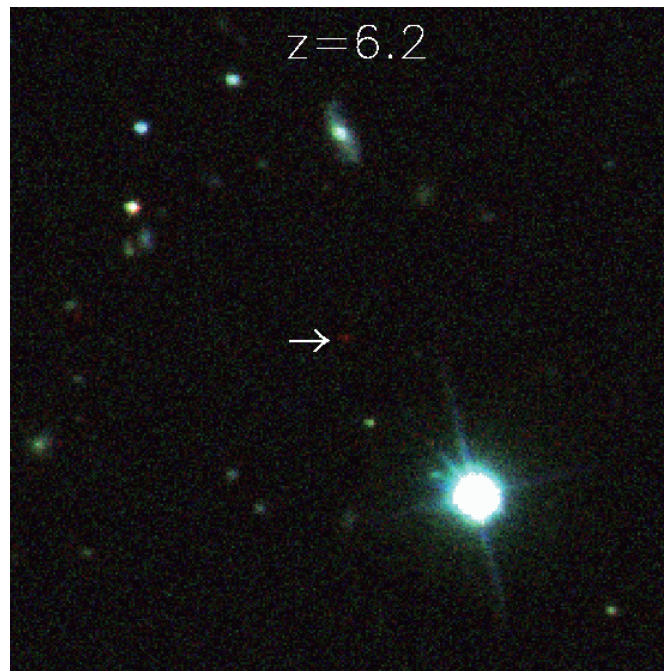


図 2.5-2 宇宙で最も遠い天体(クエーサー)の例。SDSS(Sloan Digital Sky Survey)で発見された赤方偏移 $z=6.2$ のクエーサー。印刷だとほとんど見えないかもしれないが中央の矢印の先に赤っぽい小さな点として写っている。

(<http://www.sdss.org/news/releases/20010605.edr.img1.html>)

2. 5. 3 ガンマ線バースト

ガンマ線バーストは宇宙のある天体が突然ガンマ線で数十秒ほど輝く謎の爆発現象です。ガンマ線はX線よりさらに波長が短い光で、地球上では放射線として扱われており、原子力発電所や原子爆弾の爆発などででできます。宇宙で起こるガンマ線バーストも実は大気圏の外で核実験を行っていないか監視する軍事衛星が最初に発見しました。ガンマ線はこのような一見恐ろしいものですが、地球は大気で守られているので安心です。そんな危険で不思議な現象であるガンマ線バーストは発見されてすでに40年がたちます。しかし10年前まではこの正体が全く分からず、ガンマ線を出す天体が太陽系にあるのか、銀河系にあるのか、あるいは遠い銀河からくるのかすらさっぱりわかりませんでした。

これに対しまずアメリカの CGRO(Compton Gamma Ray Observatory)という衛星が成果を上げました。たくさんのガンマ線バーストのやってくる方向を調べると宇宙のどの方向にも均等に分布しているのがわかりました。もしガンマ線バーストが私たちの銀河系円盤に分布する現象なら天の川に沿った方向に集中して観測されるので、この銀河系円盤起源説は否定されました。同様に太陽系起源説も否定されました。こうして銀河系の外からガンマ線がやってくることがわかりました。しかしガンマ線バーストの方向はまだ大雑把にしかわからず、たくさんある銀河のうちどれがガンマ線バーストを起こしたのかはわかりませんでした。

続いて BeppoSAX というイタリアの X 線天文衛星が成果を上げました。ガンマ線バーストの起こった方向を数時間後に X 線で観測し、X 線で徐々に暗くなっていく天体を発見しました。ガンマ線で輝くのはたった数十秒ですが、X 線ではその残光が残っていたのです。これによりガンマ線バーストの比較的詳細な方向が分かりました。続いてその場所を可視光（人間の目で見える光）で観測すると、暗い銀河の中に徐々に暗くなる天体があり、 z （赤方偏移）が 1 程度の天体とわかりました（図 2.5-3）。これは比較的近い例で、暗い（つまり遠くで起こった）ガンマ線バーストは z が 10 を越えると考えられています。これほど遠くにあるのにガンマ線は短い間ですがとても明るく輝きます。太陽が一生かけて出す何倍ものエネルギーを一瞬で放出するのです。もし太陽系の近くで起こったら大変です。人類が滅亡してしまうかもしれません。宇宙最大の爆発といえるでしょう。しかしこの爆発は一体どうやって起こるのか詳しいことはほとんど分かっていません。現在の天文学最大の謎の一つといえるでしょう。これほどの天体現象ですので最近ではガンマ線バースト専用の天文衛星を打ち上げるまで観測するほどになっています。

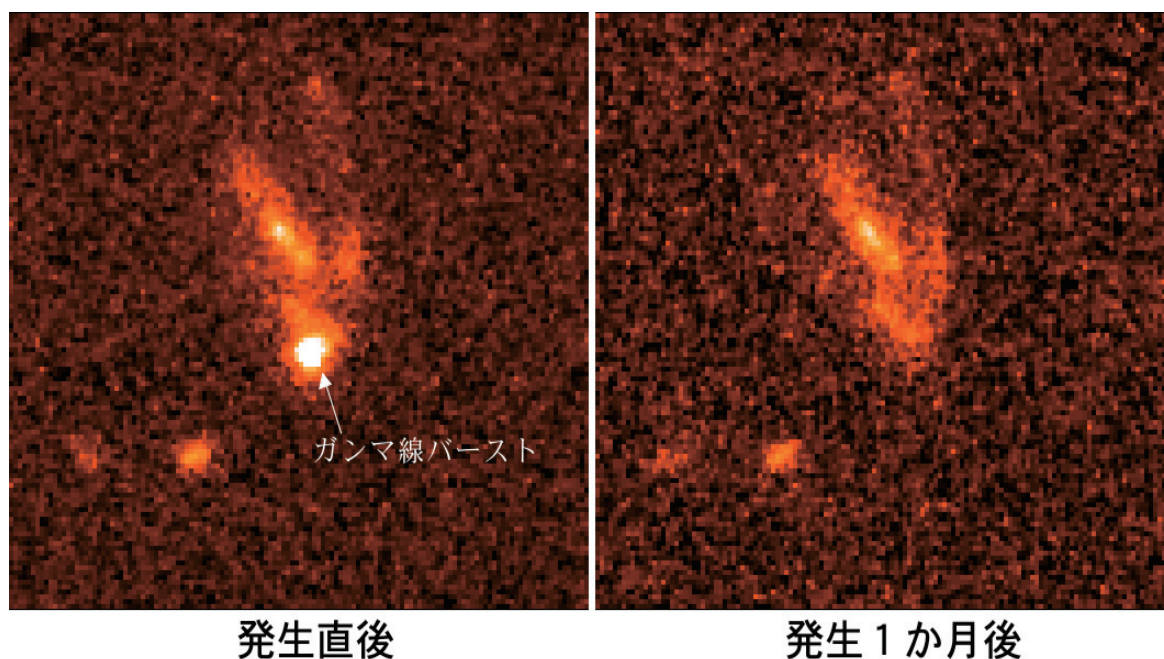


図 2.5-3 γ 線バースト。爆発直後と1月後の写真（ハッブル宇宙望遠鏡）。暗くなっているのが γ 線バーストの本体で周りの不規則な形をした天体が γ 線バーストのある銀河。
(<http://www.astro.isas.ac.jp/xjapan/asca/6/grb/>)

2. 5. 4 元素の工場

私たちの体は水（水素と酸素）やカルシウムといった元素で構成されています。また地球は鉄やシリコンでできています。一方宇宙が誕生した時は水素とヘリウム（原子番号の1番と2番）しか存在しなかったことが明らかになっています。つまり酸素や鉄といった原子番号の大きい元素（天文学者は重い元素、略して重元素と呼びます）は宇宙が誕生した後何処かで作られたということになります。その生成場所となっているのが星の内部です。地球

くらいの軽い星(惑星)では元素の工場にはなりませんが、ずっと重い太陽内部では毎日水素からヘリウムが生産されています。地球をつくっている重い元素は、地球自身が生産したものではなく、地球ができるより前に他の星の内部でできたものです。太陽と同程度、または、もっと重い星はこのヘリウムから炭素、酸素、窒素を作ったり、さらに鉄を作ったりしています。星は元素の工場といえるでしょう。しかし作ったまま星の中に蓄えているだけではいつまでたっても地球の様な重い元素でできた惑星はできませんし、惑星で暮らす我々のような生物もできません。重い元素を工場(星)の外に取り出す仕組みが必要です。それが超新星爆発です。星は重い元素を作ることでエネルギーを取り出して太陽の様に明るく輝くのですが、いつかは限界が来ます。この限界がくると星は爆発し、重元素が宇宙空間にばらまかれ、それが次世代の星や惑星の材料となるのです。超新星爆発は星の一生最後の大爆発です。だから新星といっても星の誕生ではありません。星の死といえるでしょう。星には爆発を起こさず最後に白色矮星という小さな冷たい星になってしまうものもあります。太陽もいつかはこの白色矮星になってしまうと予想されていますが、この白色矮星もいつかまた別の星に巡り会い、相手の星から新しい「燃料」をもらおうと爆発すると考えられています。これも元素をばらまく原因になります。

図 2.5-4 はチャンドラ衛星でとられら超新星爆発の後に残された残骸です。X 線の細かい波長別にこの天体を見てみると、爆発によってまき散らされたシリコンや鉄やカルシウムといった元素があちこちに散らばっているのが分かります。元素工場の証拠写真です。これら飛び散った元素はいつか地球の様な惑星の材料に使われ、我々のような知的生命の誕生に一役買うことになるかもしれません。

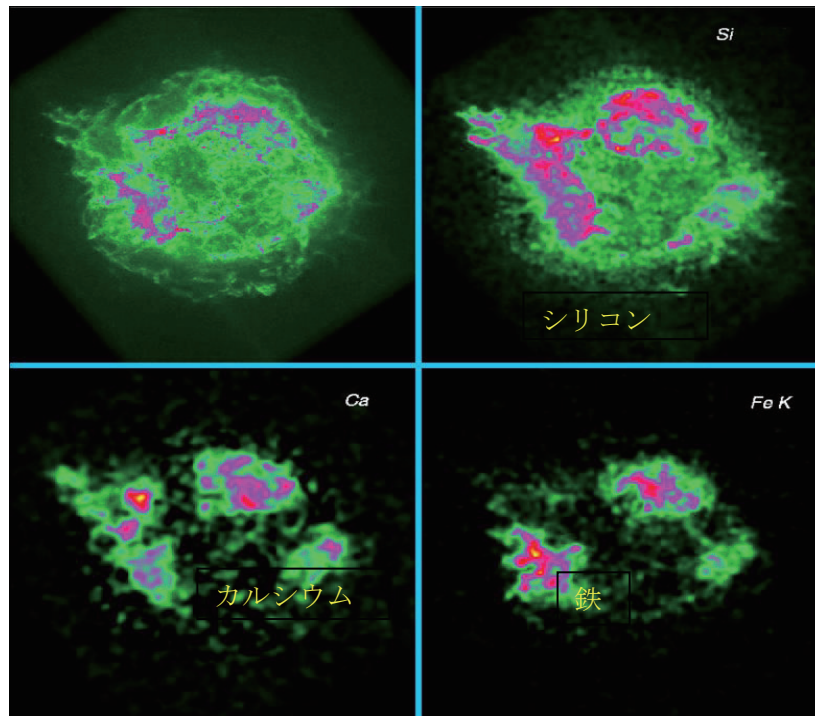


図 2.5-4 Cas-A 元素別写真(X 線)。明るい部分にそれぞれの元素がたくさんあることを示しています。

http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/objects/heapow/archive/nebulae/cas_a_elements.htm

2. 5. 5 ジェット

宇宙にはジェットと呼ばれる天体があります。ジェットというと飛行機のジェット機が思い浮かぶ人も多いでしょう。イメージとしては悪くありません。図 2.5-5 はジェットの一例です。ジェット機から出る飛行機雲のように見えなくもありません。ジェットは細い管を流れたものが連続的に噴き出す現象です。ホースの先から水が飛び出てくるようなものです。天文では、電波、光で光っている細長く伸びた領域をジェットとよび、強いガス流だと考えられています。スピードはほとんど光と同じという例も珍しくありません。ジェットはいくつか種類があります。星くらいの重さのブラックホールから出てくるジェット、生まれかけの星から出てくるジェット、銀河の中心にあるブラックホールから出てくるジェットなどいろいろあり、宇宙では比較的ありふれた天体です。しかし、どこにでもあるとはいえないものの、どうやって細くて高速で飛んでいくジェットを作れるのか、そのメカニズムはわかっていません。多くの研究者は降着円盤といっしょに鞭のようにになって回転する磁力線を用いればジェットの生成をうまく説明できると考えています。しかしこの磁力線が曲者でなかなかうまく観測する方法がないのです。それを観測で確かめるのもこれからの天文学の仕事です。

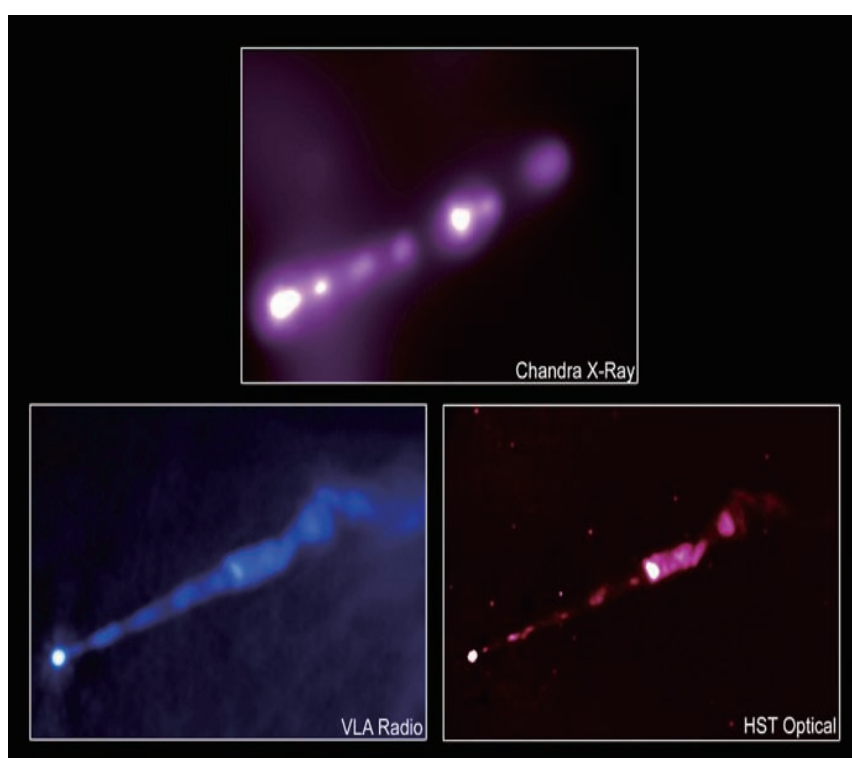


図 2.5-5 銀河 M87 の中心から吹き出る ジェット。一番左の明るい点が根本でそこから右方向にジェットが伸びています。中央上が X 線、左下が電波、右下が可視光での画像です。
(<http://chandra.harvard.edu/photo/2001/0134/index.html>)

2. 5. 6 太陽

太陽は広い宇宙の中では普通の星の1つにすぎませんが、我々から見ればとても近くにあるのでその性質がよく分かっています。図 2.5-6 は電波や光、X線で見た太陽の写真です。全然違って見えますね。図 2.5-7 は時間をあけて取ったX線の写真を並べたものです。明るい時と暗い時があります。目で見える太陽はずっと同じ明るさに見えますが、違った波長で見ると太陽は11年の周期で明るさを変えていきます。また明るいときもX線でみると太陽全体が輝くのではなく、明るい部分と暗い部分に分かれています。明るい部分はフレアと呼ばれる爆発現象を起こしたところです。フレアは衛星放送など私たちの生活に身近なところにも影響を与えることがあります。大気のない宇宙へ行くとフレアは大問題になります。太陽から宇宙線と呼ばれる粒子が大量にとんでくるのです。この粒子は放射能と同じで人体に悪い影響を与えます。地上では大気が我々を守ってくれるので気になりませんが、宇宙で仕事をする宇宙飛行士には大問題です。国際宇宙ステーションでは宇宙線が大量に飛んでくる時期には、宇宙飛行士が壁の厚い部屋に避難します。フレアがいつ起こるかは予測できませんが、フレアが起こって光以外の粒子(主に荷電粒子)が地球(や宇宙ステーション)に到達するまで相当の時間がかかるので、荷電粒子の地球到達は予報できるのです。実際、電話やインターネットを通じて公開されていて、宇宙天気予報と呼ばれています。

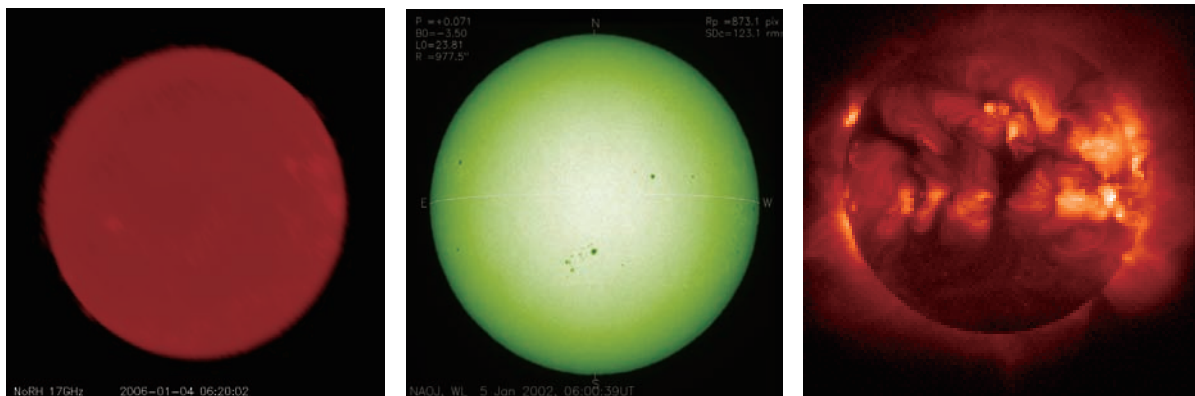


図 2.5-6 太陽の電波(左)、可視光(中)、X線(右)での写真。違う時期に撮ったもの。可視光では黒点が見える。

(電波 <http://solar.nro.nao.ac.jp/norh/html/10min/realtime.html>)

(可視光 <http://solarwww.mtk.nao.ac.jp/solar/wl-fulldisk/image/2002/sr020105.jpg>)

(X線 http://www.isas.jaxa.jp/home/solar/diff_sun.html)

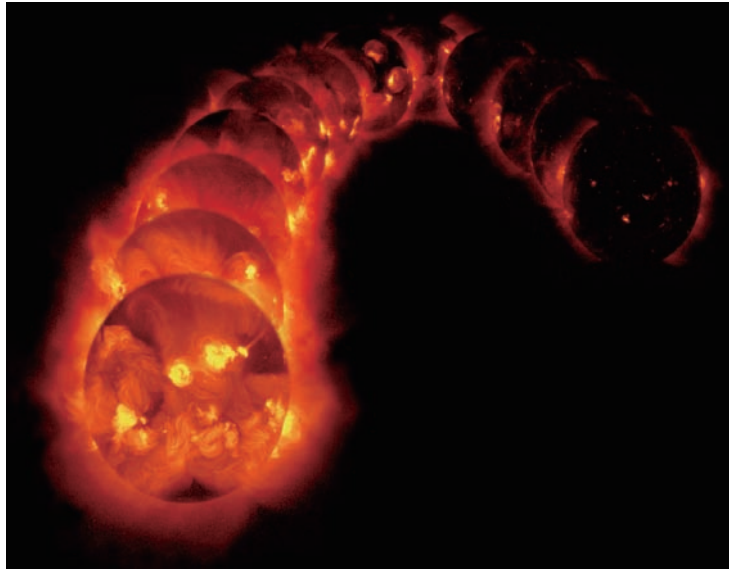


図 2.5-7 X 線でみた太陽活動の変化の様子(ようこう衛星)「11 年周期」
(http://www.isas.jaxa.jp/home/solar/diff_sun.html の一番下)

2. 5. 7 太陽系外惑星

宇宙人はいるのでしょうか？という問いにはだれもが興味をもつでしょう。宇宙人がいるとすればそれはやはり地球の様な惑星に住んでいるでしょう。太陽のように自分で光っている星(恒星)にはさすがに熱くて生物は住めません。では太陽以外の恒星の周りにも惑星はあるのでしょうか？多くの天文学者は当然あると思っていましたが、なかなかその証拠が見つかりませんでした。恒星の周りに惑星があったとしても強烈な星の光に埋もれて、惑星を画像として捉えることは非常に困難なのです。太陽系外惑星の証拠が最初に見つかったのは 1995 年です。発見の方法は恒星からの光のドップラー効果を利用した間接的なものでした。

1995 年に最初の太陽系外惑星がペガサス座 51 番星に発見されて以来、太陽系外惑星の発見が相次ぎました。2005 年の段階では 160 個を超える太陽系外惑星が見つかっています。ペガサス座 51 番星は木星の 0.6 倍もの大質量の惑星が水星軌道の 1/8 ほどの軌道をわず 4.2 日で回っているという予想外の惑星でした。すでに測定技術はあったのですが、誰もそんな惑星があるとは予想していなかったのも、そんな短周期で探索しなかったのです。それが一旦そんな惑星があることが分かるとみんな一気に観測するので、どっと見つかったというわけです。

検出方法は、視線速度法です。惑星の公転により中心の恒星がわずかではあるが振り回され、この動きを恒星の光のドップラーシフトを調べることで検出するというものです。この方法では恒星の近くにある大質量の惑星が発見されやすいです。

太陽系の場合はどうかといえば、最大の惑星である木星によって振り回される効果が一

番大きいです。太陽は、太陽－木星の重心の回りを半径73万km程度の軌道で12年で1周しています。これは太陽の半径くらいですので結構大きいです。でも12年でやっと1周するので、速さはたった毎秒12mです。太陽表面の自転の速さが毎秒2kmであるのに比べると170分の1です。太陽からの吸収線は最初からこの程度広がっていますので、その中心を1000分の1の精度で測るのは大変です。最初の惑星系ペガサス座51番星の場合、毎秒50mの速度で4.2日周期でした。

太陽系外惑星の検出方法には、前面通過法もあります。これは惑星が恒星のちょうど手前に来て恒星の一部を隠す時に恒星の光が減光するのを測る方法です。この方法で見つかっている惑星も少数あります。将来的には直接惑星を恒星と分離して見ることもできるようになるでしょう。

2. 5. 8 銀河団、超銀河団

銀河は星の集まりです。銀河も実はお隣のアンドロメダ銀河などと集団を作り銀河団をつくっています。図2.5-8は銀河団の例ですが、これはかなり規模の小さい例です。この銀河団、実は単なる銀河の集団ではありません。銀河団をX線で見ると全く違った様子を見せるのです。図2.5-9は別の銀河団の写真ですがX線では個々の銀河が光っているのではなく、銀河団全体が明るく光っているのがみえるでしょう。このX線のスペクトルを見てみると高温プラズマ(熱いガス)からのX線の特徴を持っています。プラズマの温度は高く、場合によっては1億度を超えます。しかもそのプラズマの量を調べると銀河の重さを全部足したものの数倍はあります。つまり銀河団は銀河の集まりというより熱いガスの塊なのです。我々の住む銀河系も実は規模は小規模ながらも銀河団の中にいます。1億度のガスなら溶けてしまいそうですが、銀河団プラズマの密度は実に小さくて100ccに原子が1つ程度です。それに比べ地上の空気100ccには、100万個の100万倍の100万倍のさらに1万倍もの原子が含まれています。銀河団プラズマはとても希薄なのです。これならほとんど地球も太陽も影響を受けませんね。

銀河団は大きさが1000万光年を超えるものもあります。ではこれが宇宙で最大の天体でしょうか？ 銀河団が集まってさらに超銀河団が形成されていると考えられていますが、これに関してはあまり研究が進んでいません。宇宙の銀河の分布を調べてみると、銀河は固まっているというより、蜘蛛の巣の様に網の目の様になっているようにも見えます。泡のようにあちこち空洞があるようにも見えます。これが宇宙最大の天体といえなくもありませんが、天文学者は「宇宙の大規模構造」と呼んだりしています。この大規模構造はとてつもなくスケールが大きいので誕生から完成までとてつもなく時間がかかります。というより現在進行形で今も成長中といえるでしょう。大規模構造にしてみれば宇宙はまだ「たったの」百数十億歳なのです。このような大規模な構造を調べ、遠く(つまり過去)と現在の様子を比較すれば宇宙全体の進化の様子が見て取れます。これは本書2. 4. 1. 6節で紹介したスローン・デジタル・スカイ・サーベイ(SDSS)の研究テーマの一つでもあります。



図 2.5-8 ヒクソンコンパクトグループと呼ばれる比較的小さな銀河の集団。

見た目だとぶつかりそうなくらい銀河が集まっている。

(http://SubaruTelescope.org/Science/press_release/1999/01/HCG40_300.jpg)

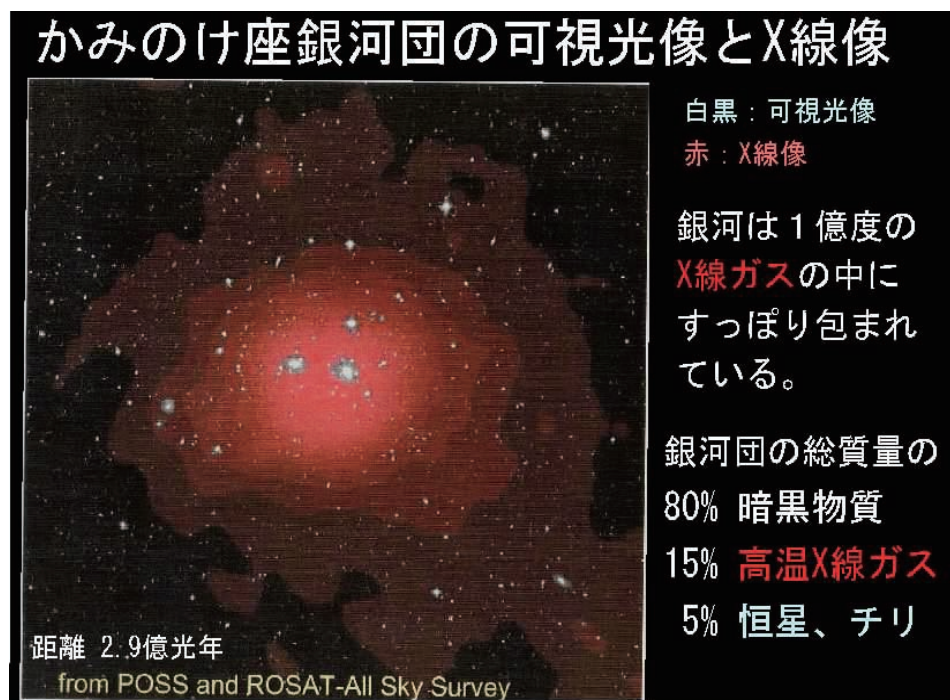


図 2.5-9 かみのけ座銀河団の可視光像とX線像、可視光では個々の銀河が輝いて見えるが、X線では全体が輝いている。(Brinkmann氏、理研セミナーより)

2. 5. 9 ダークマター

宇宙の主要メンバーは銀河です。その銀河は主に星でできています。では宇宙に存在する物質のほとんどは星になって存在していると考えて良いのでしょうか？現在の天文学の答えは NO です。ほとんどの天文学者は目に見えない物質——ダークマター（暗黒物質）——が宇宙を支配していると考えています。ダークマターは不思議な物質です。存在する、つまり質量があって重力には影響しているのに、人間が観測できる情報（主に電磁波）は出していないのです。つまり暗黒（ダーク）な物質（マター）なのです。ブラックホールのようなのですが、ダークマターは宇宙の何処にでも、おそらく地球上にも存在すると考えられています（地球上にあるかもしれないダークマターは後で出てくる2番目のダークマター候補で我々が普通に目にする物質と異なり、地球上のものにほとんど影響を及ぼしません）。銀河団の例で見てみましょう。銀河団は熱いガスの塊ですが、放っておくとどんどんガスは膨張して広がってしまいます。そうならないように銀河団を一カ所に引き留めておくには重力が必要です。ですがガス（プラズマ）と銀河の質量を全部足しても必要な重力の10%程度にしかありません。でもガスはちゃんと散らばらずに固まりとなって存在します。つまりガスと銀河以外に何かが必要なのです。それがダークマターです。現在のところ人類の科学の目を持ってもそれは見えていません。今のところ銀河団は宇宙の中で最大のものです。その最大の天体の一番の構成要素が何か分かってないのです。宇宙は重力で支配されていますがその重力にとって一番大事なもの、宇宙の主人公が誰か分かって無いといえるでしょう。それがダークマターです。

銀河団のダークマターについてもう一つ証拠をあげておきましょう。図 2.5-10 は銀河団の光での写真です。銀河の密集した部分のやや周辺に弧の形をした天体がいくつか見えます。これは銀河団がレンズの役割を果たして、レンズ（＝銀河団）の真後ろ（遠く）にある天体（クエーサー）を見かけ上明るくしていると考えられています。ここで銀河団の重力が大きいほど、つまり質量が大きいほどレンズの役割は大きくなるので、どれくらいの質量があるかが分かります。この方法でもやはり目に見える（観測できる）よりはるかに多くの物質、つまりダークマターが銀河団中にあることが分かっています。

ではいったいダークマターは何なのでしょう？候補はありますが、たくさんありすぎて確実な候補というのは今のところ見あたりません。いまのところ候補は2つのグループに分けられています。1つは銀河や星を作っているいわゆる普通の物質です（でも暗すぎて地球からは見えない）。普通の星は光り輝いて見えますが、地球の様な星は自分自身では光らずに、太陽の光を反射しているだけです。木星の様な重い惑星もそうです。惑星もどんどん重くしていき、太陽の 8%くらいの重さになると自分自身で核融合を起こして輝き始めます（私たちの地球の重さは太陽の 0.0003%しかないので、自分自身で核融合で輝くことはできません）。この太陽の8%かそれ以下の重さの星がたくさんあればダークマターの候補になります。この様な星を褐色矮星といいます。褐色矮星は存在するのは確実です。現に太陽系の近くにあるものは暗いとはいえ見つかっています。問題はそれがどれだけたくさんあるかです。ダークマター候補を2つに分けた場合のもう一つは、人類がこれまでほとんど

目にしない未知の物質です。これは天文学でなく、素粒子物理学からいくつか予言されています。たとえばアクシオンとよばれるものがあります。が、候補はたくさんあれど、どれもまだ見つかりません。ニュートリノと呼ばれる粒子もかつてはダークマターの候補でした。ニュートリノには質量があるらしいことが分かったものの、現在では軽すぎてダークマターの候補からは外されつつあるようです。

天文学は宇宙を調べる学問です。科学技術の粋を集め、最近の10年でもいろいろなことがわかりました。しかし宇宙を支配する主人公——ダークマター——がいったい何か分かっていないとは驚く人もいるでしょう。このように天文学にもまだまだやるべきことがたくさん残されているのです。



図 2.5-10 ダークマター／重力レンズ。明るい銀河達にまじって細長い弧状の天体がいっつか見える。

(<http://hubblesite.org/newscenter/newsdesk/archive/releases/2000/07/image/b>)

参考図書（易から高度へ）

- 新版 宇宙への招待、藤井旭、河出書房新社、1600 円
- 図解雑学 時空図で理解する相対性理論、和田純夫、ナツメ社、1200 円
- スペース・アトラス 宇宙のすべてがわかる本、三品隆司、PHP 研究所、1300 円
- 新版 100 億年を翔ける宇宙、加藤万里子、恒星社、2200 円
- 中性子星とパルサー、柴崎徳明、培風館、1480 円
- 宇宙のからくり、山田克哉、講談社ブルーバックス B1220、980 円
- 重力波天文学への招待、藤本真克、日本放送出版協会、850 円
- 天文学への招待、岡村定矩、朝倉書店、2900 円

参考： 宇宙環境利用と人類の将来(Ⅰ)
— いきものの星・地球 —

目 次

本書を読んで下さる方へ

1. 序論

- 1. 1 地球の創生と生物の発生、進化(執筆:石岡憲昭)
 - 1. 1. 1 地球の創生と生命誕生
 - 1. 1. 2 火星は生命誕生の母なる星か
 - 1. 1. 3 宇宙環境を利用した実験の目的・方法・実験の難しさ

2. 宇宙・地球と生物

- 2. 1 はじめに(執筆:佐藤温重)
- 2. 2 生命の起源と進化(執筆:東端 晃)
 - 2. 2. 1 太陽系の誕生
 - 2. 2. 2 生命の起源と定義
 - 2. 2. 3 原始生命の誕生
 - 2. 2. 4 原核生物の誕生
 - 2. 2. 5 酸素の発生
 - 2. 2. 6 原核生物から真核生物へ
 - 2. 2. 7 単細胞生物から多細胞生物へ
 - 2. 2. 8 生物の急発展—先カンブリア期からカンブリア期へ(顕生代)
 - 2. 2. 9 水中から陸上へ—オゾン層の形成(オルドビス紀～シルル紀)
 - 2. 2. 10 植物の進化(シダ植物から裸子植物へ)
 - 2. 2. 11 動物の上陸と骨格の形成
 - 2. 2. 12 生物の進化と重力環境
 - 2. 2. 13 地球から宇宙へ
- 2. 3 地球外生物、地球外文明は存在するか(執筆:谷垣文章)
 - 2. 3. 1 宇宙人という概念
 - 2. 3. 2 火星からの隕石
 - 2. 3. 3 地球外知的生物の存在する確率
 - 2. 3. 4 宇宙人探しという挑戦の始まり
 - 2. 3. 5 本格的に始まったSETI計画
- 2. 4 生物の重力感受の仕組み(執筆:永松愛子)
 - 2. 4. 1 生物の重力感受機構

- 2. 4. 2 植物の重力屈性機構
- 2. 4. 3 宇宙実験での重力感受機構の解明
- 参考文献、論文

2. 5 宇宙環境での生物の生殖と発生(執筆: 矢野幸子)

- 2. 5. 1 アフリカツメガエルの受精と発生
- 2. 5. 2 イモリの産卵・発生実験
- 2. 5. 3 卵がヒヨコになるには重力が必要
- 2. 5. 4 宇宙でのメダカ
- 2. 5. 5 微小重力下における生物の生活環境に関する研究
- 2. 5. 6 宇宙滞在のための継世代培養を実現するための装置や技術について
- 2. 5節の付録:用語の説明
- 参考文献

2. 6 生物は宇宙に適応できるか(執筆: 泉龍太郎)

- 2. 6. 1 生物の適応とは何ぞや
- 2. 6. 2 ヒトは宇宙でどうなるか
- 2. 6. 3 宇宙への適応に向けて

[宇宙環境利用と人類の将来 編集者紹介]

井口洋夫:宇宙航空研究開発機構 顧問

佐藤温重:元宇宙航空研究開発機構 アドバイザー

中島英彰:国立環境研究所 総括研究官

三原建弘:理化学研究所 研究員

山本昌孝:宇宙航空研究開発機構 主幹研究員(編集まとめ)

[宇宙環境利用と人類の将来(Ⅰ)―いきものの星・地球― 執筆者紹介]

石岡憲昭:宇宙航空研究開発機構 教授

佐藤温重:元宇宙航空研究開発機構 アドバイザー

東端 晃:宇宙航空研究開発機構 助教

谷垣文章:宇宙航空研究開発機構 主任開発員

永松愛子:宇宙航空研究開発機構 主任研究員

矢野幸子:宇宙航空研究開発機構 主任研究員

泉龍太郎:宇宙航空研究開発機構 主任研究員

参考： 宇宙環境利用と人類の将来(Ⅱ)
— 宇宙に住む、宇宙から地球をみる —

目 次

本書を読んで下さる方へ

1. 序論

1. 1 宇宙環境について(執筆:小林礼人)

1. 1. 1 現在利用している宇宙の環境—地球圏宇宙—

1. 2 国際宇宙ステーション(ISS)(執筆:山本昌孝)

1. 3 宇宙実験の現状

1. 3. 1 宇宙環境を利用した材料科学実験(執筆:石川毅彦)

1. 3. 2 宇宙環境を利用した基礎物理学実験(執筆:小林礼人)

1. 3. 3 宇宙環境を利用したライフサイエンス実験の目的・方法・実験の難しさ (執筆:石岡憲昭)

2. 宇宙に住む

2. 1 はじめに(執筆:山本昌孝)

2. 2 スペースシャトル、ISS における生活

— 向井飛行士との対談— 聞き手:松本信二

2. 2. 1 無重力の生活

2. 2. 2 食べたり飲んだり

2. 2. 3 宇宙での睡眠

2. 2. 4 バードレッグス アンド ムーンフェイス

2. 2. 5 仕事の効率

2. 2. 6 宇宙でのやすらぎと楽しみ

2. 2. 7 室内のデザイン

2. 3 宇宙ホテル、月面基地の建設(執筆:松本信二)

2. 3. 1 アポロ計画と月開発の現状

2. 3. 2 月の環境と資源

2. 3. 3 月に人が住む目的

2. 3. 4 月面基地の建設シナリオ

2. 3. 5 月面基地の建築構法

2. 4 宇宙天気予報(執筆:松本晴久)

- 2. 4. 1 宇宙環境
- 2. 4. 2 有人宇宙活動への影響
- 2. 4. 3 その他の影響
- 2. 4. 4 宇宙天気予報の現状と将来

2. 5 火星に住む(執筆:石川洋二)

- 2. 5. 1 火星とは?
- 2. 5. 2 火星の居住環境
- 2. 5. 3 生命探査
- 2. 5. 4 火星の有人探査
- 2. 5. 5 火星で見る空
- 2. 5. 6 火星居住
- 2. 5. 7 火星のテラフォーミング計画

3. 宇宙から地球をみる

3. 1 大気・オゾン層の観測(執筆:中島英彰)

- 3. 1. 1 地球大気の変遷
- 3. 1. 2 雲や台風の観測
- 3. 1. 3 オゾン層の観測
- 3. 1. 4 温室効果気体の観測
- 3. 1. 5 大気汚染物質の観測

3. 2 オーロラの観測(執筆:高橋幸弘)

- 3. 2. 1 地上から見たオーロラ
- 3. 2. 2 地上観測から人工衛星観測へ
- 3. 2. 3 オーロラはどうしてできるか
- 3. 2. 4 人工衛星による直接観測
- 3. 2. 5 衛星観測の新展開
- 3. 2. 6 オーロラ科学から宇宙天気予報へ

3. 3 地球の水循環を測定する―熱帯降雨の観測(執筆:沖 理子)

- 3. 3. 1 地球表層環境を特徴付けているもの、生命を育む水
- 3. 3. 2 水の循環と大気の大循環
- 3. 3. 3 気候の変動と水資源

- 3. 3. 4 水の観測
 - 3. 3. 5 熱帯降雨
 - 3. 3. 6 降水観測の今後

 - 3. 4 海洋の観測(執筆:江淵直人)
 - 3. 4. 1 はじめに
 - 3. 4. 2 海面温度
 - 3. 4. 3 海面高度
 - 3. 4. 4 海上風速・風向
 - 3. 4. 5 海色と植物プランクトン

 - 3. 5 陸域環境のリモートセンシング(執筆:亀山 哲)
 - 3. 5. 1 水資源環境を観測する?
 - 3. 5. 2 陸域リモートセンシングの原理
 - 3. 5. 3 陸域における水環境
 - 3. 5. 4 水のはたす役割と実際の観測技術
 - 3. 5. 5 陸域リモートセンシングの将来

 - 3. 6 国際宇宙ステーションからの観測(執筆:笠井康子)
 - 3. 6. 1 私たちの地球に特有なオゾン層
 - 3. 6. 2 国際宇宙ステーション搭載SMILES
 - 3. 6. 3 SMILESの特徴
 - 3. 6. 4 SMILESに期待されること
- 付録:人工衛星のプラットフォームと搭載センサ

参考 : 宇宙環境利用と人類の将来(Ⅰ)— いきものの星・地球 — 目次

[宇宙環境利用と人類の将来 編集者紹介]

井口洋夫:宇宙航空研究開発機構 顧問

佐藤温重:元宇宙航空研究開発機構 アドバイザー

中島英彰:国立環境研究所 総括研究官

三原建弘:理化学研究所 研究員

山本昌孝:宇宙航空研究開発機構 主幹研究員(編集まとめ)

[宇宙環境利用と人類の将来(Ⅱ)―宇宙に住む、宇宙から地球をみる― 執筆者紹介]

小林礼人:中部大学(元宇宙航空研究開発機構 研究員)

山本昌孝:宇宙航空研究開発機構 主幹研究員

石川毅彦:宇宙航空研究開発機構 準教授

石岡憲昭:宇宙航空研究開発機構 教授

向井千秋:宇宙航空研究開発機構 宇宙飛行士

松本信二:CSPジャパン

松本晴久:宇宙航空研究開発機構 技術領域リーダー

石川洋二:大林組

中島英彰:国立環境研究所

高橋幸弘:東北大学

沖 理子:宇宙航空研究開発機構 主任研究員

江淵直人:北海道大学

亀山 哲:国立環境研究所

笠井康子:情報通信研究機構

宇宙航空研究開発機構特別資料 JAXA-SP-07-028

発行日 平成20年3月31日
編集・発行 宇宙航空研究開発機構
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1
URL: <http://www.jaxa.jp/>
印刷・製本 ケーティエス情報(株)

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1

TEL:029-868-2079 FAX:029-868-2956

© 2008 宇宙航空研究開発機構

※ 本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等加工することを禁じます。

この用紙は地球環境・森林資源のため再生紙を使用しています。

