

望遠鏡 400 年【2】

ハーシェルの宇宙と望遠鏡

横尾武夫

1. 一台の望遠鏡で

一人の少年が一台の望遠鏡を自分の物にして、初めて宇宙の姿を垣間見た場合を考えてみよう。彼は、視野に入る天体の美しく神秘的な姿に大きな感動を得ることであろう。しかし、その一台の望遠鏡だけで、天体までの距離を測ったり、宇宙の構造について考えることができるとは、とても思わないのではないだろうか。

ところが、天文学の先人達は、たった一台の望遠鏡で、宇宙の構造と大きさを認識し、それを人々に知らしめるという偉大な仕事を成し遂げてきたのである。

ガリレオ・ガリレイ（1564～1642）は、自ら屈折望遠鏡を製作し、それを天体観測に用いた最初の人物である。彼は、実地の観測の結果をもとに、当時のドグマであった神学的な天動説が間違っていることを実証した。例えば、金星の満ち欠けの様子は、地球、金星、太陽の位置関係を明白に表し、それは、プトレマイオスの宇宙論を否定するものであることを、明らかにしたのである。

ニュートン（1642～1727）は反射望遠鏡の原理を発明し、それを自作した。彼はそれによる天体観測を通じて、恒星の距離を推定する方法を着想した。彼は、恒星は太陽と同じ天体であると考えていた。そして、土星は1等の恒星とほぼ同じ明るさで見えることに着目した。恒星が太陽と同じ光度であるとするれば、土星が太陽光をどれだけ反射しているかが分かれば、1等星までの距離を知ることができる。望遠鏡による測定によれば、土星の視半径は約10秒角である。それから、土星の断面積はその太陽距離を半径とする球体の面積の約50億分の1であることが計算で

き、それが土星の太陽単位での光度に対応する。とすれば、地球から1等星は土星までの距離の約2万倍の所にあることになり、すなわち地球-太陽距離の約20万倍と推定できる。この距離は、約1パーセクにあたり、近距離星の距離を正しく言い当てている。当時、恒星の年周視差の測定はまだ不可能であったが、その目的に重要な指標を与えたのである。



図1 ハーシェル[4]

ウィリアム・ハーシェル（1738～1822）は、巨大な反射望遠鏡を自分で製作し、宇宙の構造を解明するための膨大な観測を行い、現代でいう銀河系の概念を作り上げた。本文では、その観測と思考過程を探ることにする。

2. ハーシェルの望遠鏡

18世紀から19世紀にかけてイギリスで活躍した天文学者ウィリアム・ハーシェルの生涯と業績については、多くの伝記を通じて良く知られている。ハーシェルは当時の西欧の天文学会においては特異な存在であったといえる。それは彼の出自が音楽家であり、天文学研究はアマチュアとして独学で始めたことだけをいうのではない。当時の天文学の主流は、理論的な面で天体力学の応用と精緻化であり、観測的には位置天文学の精密化であった。彼の研究は観測天文学であり、必要な望遠鏡を自ら設計、製作し、それは当時の水準をはるかに凌ぐものであった。しかも、研究対象が星雲や星団などで、当時は誰もが手をつけようとはしない天体に真正面から取り組

んだのである。

ここでは、彼が生涯を通じて製作した望遠鏡を概観してみよう。

2.1 7 フィート反射望遠鏡

ハーシェルは、英国のバースで天文学を独学で始めたころは、屈折望遠鏡を用いていたが、やがて、より大きな反射望遠鏡の製作に取り組んだ。

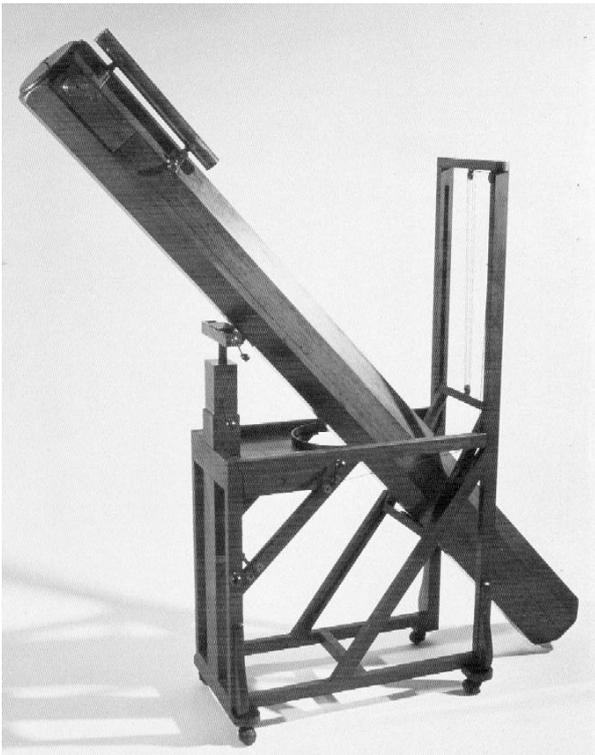


図2 7フィート望遠鏡：1781年に完成したモデル。口径15cm、焦点距離2.4m。大英科学博物館が復元

図2は、1781年に完成させた口径6インチ（15センチ）の反射望遠鏡を復元したものである。主鏡は銅と錫の合金（青銅）の鋳物を研磨したものであり、架台はマホガニー製の経緯台である。彼は、このような望遠鏡で、主として二重星の観測をしていたのであるが、その過程で、後に天王星と名づけられる新惑星を発見した。その業績が認められたことで王立協会の会員に推挙され、本格的な天文学の研究に進むことになった。このタイ

プの望遠鏡は彼自身により多数製作され、販売されて彼の収入源の一部にもなった。

2.2 20 フィート望遠鏡

彼の天文学への情熱はさらに高まり、1782年にウィンザーで口径19インチ（47.5センチ）、焦点距離20フィート（6メートル）の巨大な望遠鏡を作り上げた（図3）。主鏡は青銅の鋳物を研磨したものであり、架台は木製のがっしりとした機構で、取り扱いは比較的容易であったといわれている。ただし実際の観測における操作には助手は必要であった。望遠鏡の操作の補助と記録を担当したのは、彼の妹であり終生の助手であり共同研究者であったカロライン・ハーシェル（1750～1848）である。

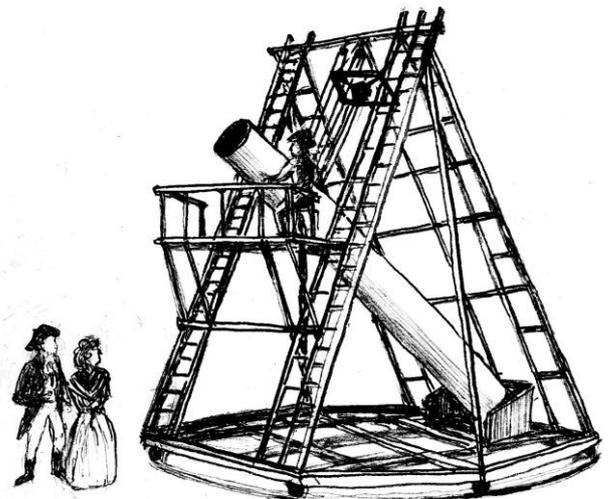


図3 20フィート望遠鏡：1782年、ウィンザーで製作。口径48cm、焦点距離6m

当時としては破格の大きさと性能を持つもので、天王星の衛星の発見、重星の研究、非恒星天体の搜索、など彼の主要な研究はこの望遠鏡でなされている。後に述べる「ハーシェルの宇宙」を導き出した星数の掃天観測もこの望遠鏡で行われた。

2.3 40 フィート望遠鏡

1789年に、ジョージ3世の後援を得て、

さらに巨大な口径 122 センチの反射望遠鏡（40 フィート望遠鏡）を彼自身の手により完成させた（図 4）。さすがに大きすぎて観測操作は大変に難しかったようである。この望遠鏡による研究の成果はあまり知られていないが、これで土星の衛星ミマスとエンケラドスを発見した。

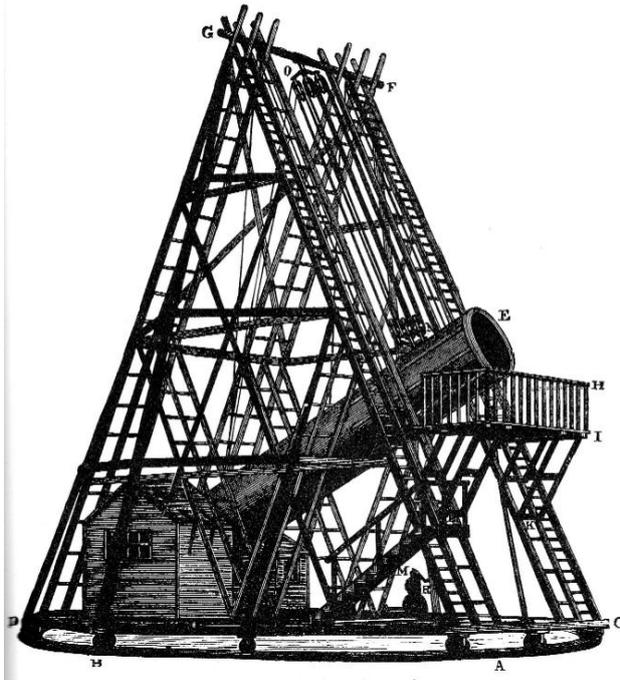


図 4 40 フィート望遠鏡：1789 年、スラウに建設。口径 122 cm、焦点距離 12m

3. ハーシェルの宇宙

図 5 は「ハーシェルの宇宙」とよばれる図で、天文学史や天文学の入門書、教科書などに必ずといってよいほど掲載されているので、天文学に関わらない人でも一度は見たことがあるだろう。図 5 は、我々が住む宇宙はレンズのような扁平な構造をした星の集団であること示している。天の川は宇宙の奥行きが深い方向を見ているのである。

この図はハーシェルが 1785 年に王立協会の機関紙 "Philosophical Transaction" に発表した題名 "Construction of Heavens" という論文に載せられたものである。ハーシェルはこの宇宙の地図といわれるものを、文字

通りたった一台の望遠鏡による観測で、構築したのであった。

ここでは、この論文に従って、彼の観測と思考の過程を見てみよう。

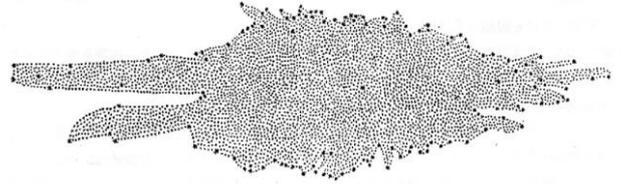


図 5 ハーシェルの宇宙：中心の星印が太陽

3.1 観測

この研究における観測の手法は、天空のある部分に望遠鏡を向け、視野に見える星の数を数え上げることであり、その観測を全天にわたって覆いつくす（掃天）という、壮大で多大な労力の要る仕事である。これは、現代天文学では星の計数（Star count）という統計的研究における基礎的な観測方法である。

ハーシェルがこの観測に用いた望遠鏡は、20 フィート望遠鏡である。視野は直径が 15 分角の円形であり、倍率は約 160 倍であった。望遠鏡を子午線の方角に向けて高度をセットし、日周運動により目的の領域が視野に入るのを待ち受けて観測した。望遠鏡の向きは上下約 2° の微調整ができた。目的の領域について近傍の 10 領域について観測し、それらの星数の平均をとった。星数が非常に多い領域では視野を $1/2$ または $1/4$ に絞って計数している。また、局部的に星団や星雲があって星数が極端に多い領域や、逆に星数が極端に少ない暗黒星雲の領域は平均から除外している。

このようにして観測された視野内の星数の平均値を、彼はゲージ（GUAGE）と呼んでいる。ゲージは計数を意味するのであろうが、後で述べるように星の密度は宇宙の深さを示すもので、本来の「ものさし」の意味にもかけているのだろう。

観測は 1783 年から 2 年間にわたり続けられ、論文には 683 の領域の結果が載せられている。それには、座標（赤経と赤緯）、ゲージ（星数の平均値）、観測回数、それに空の状態などのコメントが含まれている。座標の元期は、フラムスチード星表によるとあるから 1700 年であろう。図 6 には彼が観測した領域を正矩投影法の図上にマークしたものを示す。

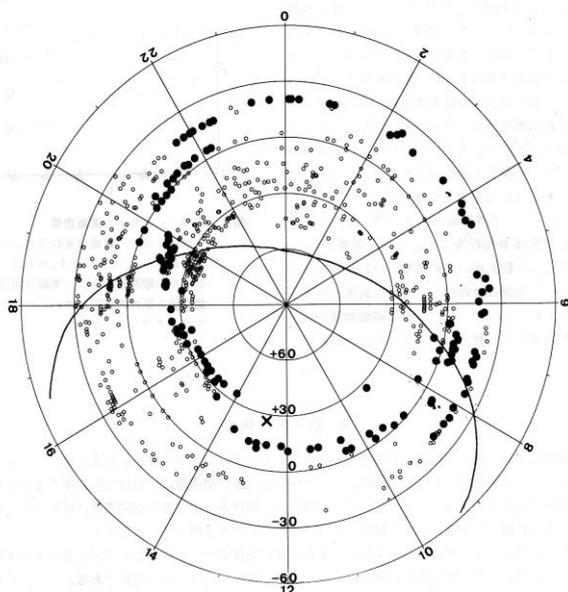


図 6 ハーシェルの掃天領域：正矩投影による赤道座標上のハーシェルの観測点。黒丸は解析に使用した位置。楕円は銀河赤道。×印は銀北極

彼は全天を隈なく観測したのではなく、天の川に垂直な大円を重点的に観測していることがわかる。図の大きい黒丸は、後に述べるように、銀河系の断面図を制作する時に用いた領域を示している。

彼の観測において限界等級はどの程度であったかを知るために、彼の観測結果と、現代の掃天観測の結果を比較してみた。図 7 に、彼が計数した星数を 1° 平方あたりの密度に換算し、 5° ごとの銀緯ゾーンにおける平均値を丸印で示した。アレンのデータブックには、現代の測定値として、各等級の星の数密度を

銀緯ゾーンで平均した値が掲載されている。図の実線は、それぞれの限界等級での星密度を表している。この図から、彼の観測の限界等級は約 14.5 等であることが読み取れる。

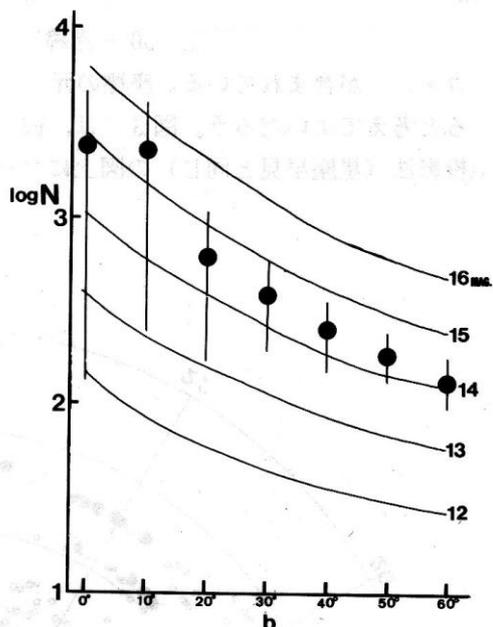


図 7 銀緯ゾーンの星の数密度：縦軸は 1° 平方あたりの星数の対数、横軸は銀緯。黒丸はハーシェルの観測値。実線は文献 7 による。

観測値が低銀緯領域で幾分高い値を示すが、これは選択効果であり、全体として現代の結果と実に良い整合性をもっている。これから、彼の観測が如何に正確に遂行されたかが分かるだろう。

3.2 宇宙構造

ハーシェルは、前述した望遠鏡の視野を通して見ることができる星の数の分布に基づいて宇宙の構造を導き出したのであるが、その思考過程を辿れば次のようになる。

最初に、次のような作業仮説を設定した。
第一の仮定：彼の望遠鏡によれば宇宙の果てまで見通すことができる。

第二の仮定：星は全て同じ本来の明るさを持っている。

第三の仮定：銀河系の中で星の空間密度は何

処でも一様である。

これらの仮定から、彼はゲージすなわち天空の単位面積あたりの星の数と宇宙の奥行きとの関係を次のように推定した。

星の密度が一様である状態を、同じ大きさの球がぎっしりと詰まっており、それぞれの球の中心に星があると考え、球の直径は、最近の星の距離であり、ハーシェルは、それを太陽に近い星と考えられるシリウス（おおいぬ座 α 星）までの距離とした。

望遠鏡の視野内に見ることができる空間は一つの円錐である。星数が多いほど、暗く見える星の数が多くなり、より遠くの星が見えている、すなわち、宇宙の奥行きが深いことを示している。この様子を、彼は、恒星間の距離を直径とする球を、一つの円錐の中に最密充填させた場合に対応させた。巧みな数理計算を用いて、直径が 15' の視野に M 個の星が見えたとき、その方向の宇宙の深さは $60 \times M^{1/3}$ シリウス距離になると推定した。

ハーシェルは、観測した 683 の領域から、図 6 に黒丸で示すように、天の川に垂直な大円に沿う 128 の領域を選びだし、先に述べた方法で、それぞれの方向における宇宙の奥行きを計算した。太陽を原点として、大円にそう角度（銀緯に相当）に対する動径距離を宇宙の奥行きとする極座標上にプロットした。そうして出来上がったのが最初に掲げた図 5 である。これは、我々が「ハーシエルの宇宙」と呼ぶ銀河系のモデルの断面図を表している。

この結果から、我々が住む宇宙は、差し渡し 850、厚さが 155 シリウス距離の扁平な構造をしていることになる。このような宇宙の形を、彼は碾き臼 (graind stone) のような、または、円盤 (disk) のような、と表現している。

図 2 の左端は、はくちょう座、右端はおおいぬ座、太陽の上方は、かみのけ座、下方

はくじら座に対応している。天の川の中心線には、川の中州のように暗黒部があり、白鳥座で特に顕著である。ハーシェルはこの部分に銀河系の切れ込みがあると考え、「碾き臼の裂け目」と表現している。実際には、これは暗黒星雲が密集したところである。

現在の値に換算すると、シリウスまでの距離は 2.7 パーセクであるから、宇宙の大きさは約 2300 パーセクとなる。

3.3 ハーシエルの宇宙観

ハーシェルは、この論文で、我々の太陽は扁平な形の巨大な星系の中心付近に存在している、と結論づけた。現在でいう銀河系の概念を創始したのである。

さらに同じ論文で、今でいう星団や星雲についての形態学的、進化論的な考察にも言及している。例えばオリオン大星雲やアンドロメダ大星雲のように Milky (乳状の) な外観を持つ星雲は、遠い、すなわち我々の銀河系の外部にある星系であり、より大きい望遠鏡を用いれば、いずれはそれらが星々に分解されて見えるだろうと考えた。銀河系は宇宙で唯一のものではなく多数の星雲（銀河）が島のように宇宙空間に点在している、という現在の宇宙観に近い宇宙を想定していた。

4. ハーシェル宇宙の変遷

ハーシェルは、上記の宇宙構造論についての論文を発表した後、研究の進展の過程で、1785 年の論文には誤りがあることに気づき、その論文を破棄してしまった。それは 1805 年頃のことだといわれている。

その誤りとは、宇宙構造を解析するときの仮定そのものであり、その後の彼自身の観測と研究で明らかになったのである。

4.1 第一の仮定の破綻

第一の仮定は、彼の口径 48 センチの望遠

鏡（20 フィート望遠鏡）で宇宙の果てまでを見通すことが出来ることであった。1789 年に、さらに巨大な口径 122 センチの反射望遠鏡（40 フィート望遠鏡）を彼自身の手により完成させた。その望遠鏡で同様な星の計数を行ったところ、視野に見える星の数がさらに増加したのである。すなわち、宇宙の果てを見通していたわけではないことになり、第一の仮定が誤っていたことになる。

4.2 第二の仮定の破綻

彼は二重星の相対運動の観測を継続していた。1804 年に、二重星であるカストル（ふたご座 α 星）が、見かけの上で接近しているのではなく、物理的に結合した「連星」であることを発見した。彼の二重星の観測的研究の目的は、恒星の距離を測ることであった。暗い方の星は遠くにあるため、二星の相対運動から年周視差が見出せると考えたのである。この二重星で実際に相対運動を検出したのであるが、それは地球の公転による見かけ動きではなく、二つの恒星が万有引力で結ばれて互いに公転している結果であることを発見したのである。このことは、明るさの違う星が同じところに在るわけで、星の本来の明るさがそれぞれで異なることが明らかにされたのである。この発見によって、第二の仮定が否定されたことになる。

4.3 第三の仮定の破綻

さらに、彼の星雲や星団などの非恒星天体の系統的な掃天観測の結果は、1785 年の宇宙論と矛盾が生じることがわかった。ハーシェルは掃天観測を遂行して、生涯で 2000 個以上の非恒星天体を記載している。それらは、後年、息子のジョン・ハーシェルによるカタログ、さらに 1912 年のドライヤーによる NGC カタログの基礎をなしたものである。

非恒星天体の天球上の分布を大局的にみる

と、恒星の分布と密接な相関があることが判明した。すなわち、星団は天の川の領域に多い。一方、星雲は天の川には見られず、天の川から離れたところに多い。1780 年代に考えていたように、もし星雲や星団が我々の銀河系と独立した島宇宙であるとする、それらの天球上の分布は恒星の分布とは無関係であるはずである。実際には、分布にこのような反相関があることから、星雲や星団が銀河系の中にあるもの、あるいは付随したものともみなさなければならない。すなわち、恒星密度の一様性の仮定に修正を加える必要にせまられたのである。そして、銀河系は宇宙において唯一のものになってしまう。

現代天文学から見れば、ハーシェルの見た星雲の多くは銀河系外星雲すなわち銀河であり、それらが天の川領域で見られないのは、星間吸収が原因であることがわかっている。ハーシェルが銀河の分布について重要な発見をしていたのである。

5. ハーシェル宇宙の今日的意義

W. ハーシェルは宇宙論ないしは宇宙構造論の創始者であったといえる。ケプラーの時代にいたるまでは、恒星は天球に張り付いた光源であるという考えが普通であった。恒星は太陽と同じ物であるという考え方はニュートンの時代に生まれた。天空の星の見かけの分布を星の空間分布すなわち宇宙の構造としてとらえるという考え方は、ハーシェルより少し早い時代に、何人かによって始められている。イギリスのアマチュア博物学者ライト（1751 年）、ドイツの哲学者カント（1755 年）、ドイツの物理学者ランベルト（1761 年）は、何れも天の川領域への星の密集に注目し、それは宇宙が扁平もしくは層状の構造であることの反映であると指摘している。ハーシェルは 1784 年の段階では、かれらの論文はまだ読んでいなかった。彼らの論理は何

れもスペキュレーションにもとづくものであったのに対し、ハーシェルは自らの定量的な観測にもとづき、数理的な解釈の上で宇宙論を構築したのである。ハーシェルの宇宙構造論は、後に彼自身によって破棄されたのであるが、科学として宇宙の構造をとらえるという新しい思想はハーシェル自身のものである。

宇宙の構造を示す図は、彼自身が破棄した後も生き残り、現在にいたるまで教科書や書籍に繰り返して引用されてきた。これは我々の住む宇宙を図示したものである。これほどわかりやすく、直感にインパクトを与える宇宙の姿は他にはないだろう。そしてハーシェルがこの宇宙の地図を作成するにあたって設定した作業仮説は、いたって簡潔で、明快で、しかも本質を含んでいる。未知の事象を解明しようとしている者に、このハーシェルの挑戦は多くの示唆を与えるであろう。そして、彼の作業仮説を彼自身が否定していった過程は、まさに天文学の進歩そのものを示しているのである。

天文学、ひいては人類の宇宙観の発展の中で、ウィリアム・ハーシェルの「宇宙図」は偉大なモニュメントの一つとして存在し続けるであろう。

後記

ハーシェルの論文は、1912年にグリニッジ天文台台長であったドライヤーが編纂した「ハーシェル全集」で我々も読むことができる。私は1990年に、神戸海洋気象台を訪れ、図書館でその書を閲覧しコピーをしてもらった。初代台長の関口鯉吉（後に東京天文台台長）の時代から収納された蔵書には、天文学関係の古い雑誌や専門書、歴史的名著、あるいは復刻版などが多数含まれており、今では貴重な天文学史のアーカイブである。ところが、1995年の震災で図書館が大きな被害を受け、蔵書は東京の気象庁に移された。その

後、図書は梱包されたまま倉庫に眠っていると聞いたが今はどうなっているのだろうか。

当時の神戸海洋気象台は港が見える小高い丘の上であって、大正ロマンを感じさせる瀟洒な建物であったが、震災後に海に近い新しいビルに移転している。近年、山手町の跡地を訪れる機会があったが、建物はすべてとり壊されて、更地になっていた。以前から、敷地内に戦災（第二次世界大戦）で被爆した姿のままのレンガ作りの建物が残されていたが、かろうじてそれだけは土台付近の一部が残されているのが金網壁の向こうに見ることができた。

参考文献

- [1] Dreyer, J.E. (ed.), *Scientific Papers of W. Herschel*, 1912
- [2] ダンネマン、F.、大自然科学史第7巻、安田徳太郎訳、三省堂、1978
- [3] 斉田 博、近代天文学の夜明け - ウィリアム・ハーシェル、誠文堂新光社、1982
- [4] Berry, A., *A Short History of Astronomy*, Dover, 1895
- [5] Hoskin, M., *The Milky Way from Antiquity to Modern Times*, in IAU Symposium No.106, ed. Woerden et al., Reidel, 1985
- [6] 横尾武夫、藤田明子、嘉数次人、W. ハーシェルの宇宙について、大阪教育大学理科教育研究年報、No.15, 1991
- [7] Allen, C.W., *Astronomical Quantities* 3rd., Athron Press, 1976

横尾武夫