

この広い宇宙いっぱい IV

「銀河」

2017年3月19日 2017年10月14日改 別当勉

プロローグ

誰でもいつかどこかで見たことがある、つまり“デジャブ : déjà vu”という体験があると思う。その一つに「天の川」が挙げられる。私は高校生の時、昔の言葉でいえば蛍雪の時代に、ふと真夜中に満天に広がるそれを観てしまった。12月のしばれる夜であった。新月頃で月がない。12月は夜空の透明度が一番高い。天空を南北に流れるきらびやかな星々の河であり、そのパノラマに度肝を抜かれた。それまで見てなかった初めての観察である。高校生になるまで夜更かしすることがなかったからともいえる。

そんな刺激を受けたのに上京したから、街の明かりが夜空を照らし星々をかくして観る機会はなくなった。しばらくしてからテレビで天の川の番組を見て、あれが天の川だったんだと納得したが、どうしてほぼ真っすぐに流れる河に見えるのだろうか、不思議さに取りつかれたのである。ようやく、それが実は円盤状で地球はその中にいるから、内からみれば確かに幅のある筋に見えることに気付いた。およそ40年前である。

そして、天体に関する書物を読み始めた。空想が破れたり、当たったりしてパチンコ玉のような頭脳の曲折に陶酔することもあったが、今から振り返ると感激の度合いは低かった。たいがいの人々と同じように夜空への視界が文明ゆえの街の明るい灯火に閉ざされて、天空への空想は未熟だったのではないかと思う。想念を拵げれば、日本人には夜空の星にたよらない生活を太古より続けてきた由来も見捨て難い。星座名がないこと、北斗七星や天狼星（シリウス）など星の名が古代中国の命名によるものであることなどを考えると、それだけで日本人の性が分かる気がする。この国の人々にはほとんど無用だったような推理が成り立つ。しかしながら、一方、明治維新らしい近代日本人の性としての科学的探究心の先鋭さに、特に現代の科学者の熾烈といえるほどの熱意に私は戸惑うほど愕いてもいる。彼ら以外のおおかたの日本人は月以外に夜空の星など気にもしていない。これはどうも、温暖で雨が多く農耕に適した風土に恵まれて、家屋すら障子一枚で外気と隔てるほど天候を拒まない、そ

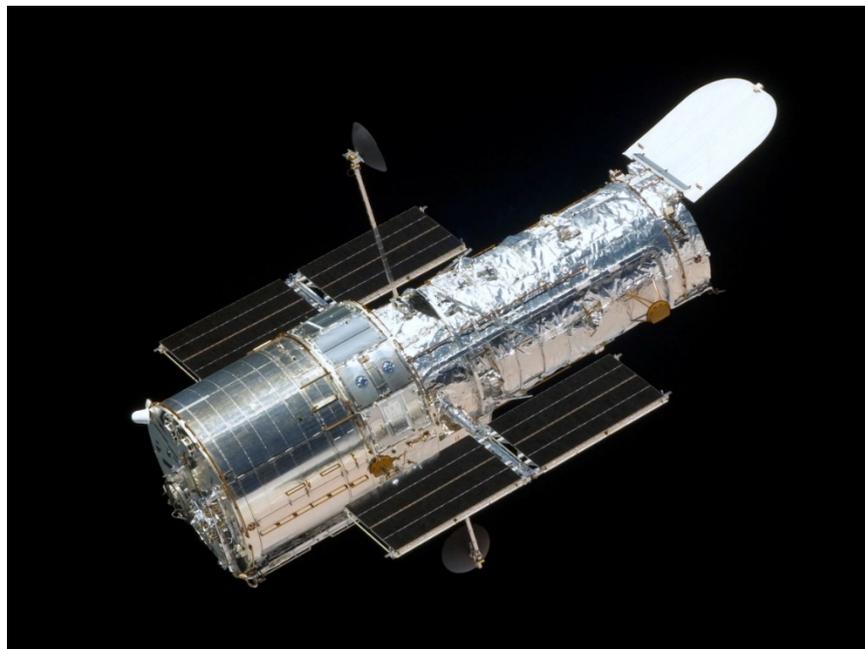


<https://apod.nasa.gov/apod/ap071020.html>

して食えなくなるという恐怖も古来より余り無かったからという話もどこかで聞いたことがある。

天空に対する私の想念や空想がことごとく破壊されたのは、ハッブル宇宙望遠鏡:HST (1990年打上げ 1993年大修理) で撮った画像を雑誌で見たときである。1995年頃だったろうか。たった22年前である。

HST 画像のおかげで、やっと、いま銀河の話ができるようになった。私のような素人よりも天文学者や宇宙物理学者のほうが燃え立ったにちがいない。大気圏の外に出た望遠鏡だから大気の揺らぎやチリによるくもりはなくなり、しかも曇天や嵐もない。口径 2.4m 反射鏡の中規模とはいえ、物凄い解像度に人類は大いなるショックを受けた。エドウィン・ハッブル (1889-1953年) が1920年頃にウィルソン山天文台で銀河を観測した望遠鏡が同じ口径の 100 インチであった。スペースシャトルに搭載可能な大きさと重量を最大限に活かした結果なのであるが、とにかく大型観光バスほどのスケールである。しかも、ハッブルが愛用した望遠鏡の規模に合わせたかったのであろう。



https://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/story/index.html

よくも打ち上げたものだと、最近は考えるようになった。というのは、もうスペースシャトルは飛ばない。HST だって寿命はある。次はどうするのか心配にもなる¹。地上では、日本の超大型 8.2m 反射鏡のスバル望遠鏡 (2000 年) や、世界最大の 10m 反射鏡を備えるケック望遠鏡 (1993 年) が、ハワイのマウナケア山頂: 4200m に設置・運用されているからひとまず安心できるが、いずれも解像度は HST に及ばないし、昼間は観測できないのでヨーロッパや南米

¹ 次世代の宇宙望遠鏡は、“**ジェームス・ウェッブ**” (NASA の元長官名) として 2018 年に NASA が打ち上げる計画にある。口径 6.5m もの反射鏡を持ち (ハッブルは 2.4m)、太陽~地球間の直線上で地球から 150 万 km 外側の第 2 ラグランジュ点:L2 にセットされる。地球公転軌道上の五つの安定静止点:L1~L5 のうちの一つである。太陽光線や地球の反射光の影響が最小となる点が L2 である。数学者ラグランジュにより求められ、予言された。既に、WMAP 衛星で実績を挙げた。

の天文台にまかせることになる。このような不安を抱くことは、私はもうマニア領域を超えてフリーク²の冥界に入っているのかもしれない。

天の川銀河の姿

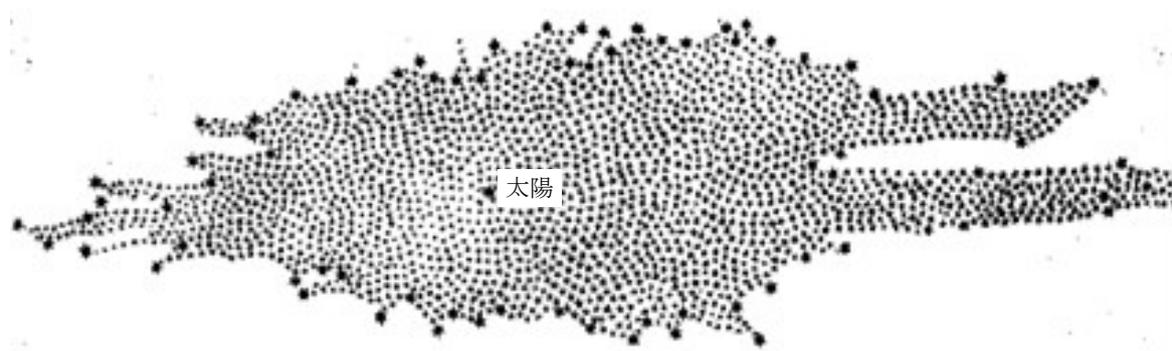
天の川は英語で“Milky Way”という。銀河は“Galaxy”というが、語源はギリシャ語の“galaxias”と言われており、これも“乳の道”の意味で、ギリシャ神話として次のようなものが語られてきた。

http://blog.livedoor.jp/galaxyfuku/archives/cat_10021255.htmlより

ギリシャの神話の一番の英雄と言えば、数々の大冒険を成し遂げた怪力ヘラクレスが、そのヘラクレスがまだ赤ん坊の頃です。「この赤ん坊を不死身の豪傑にしてやろう。それには大神ゼウス様のお后ヘーラー女神様の乳を飲ませる事だな・・・」そう考えたヘルメス神は、ヘーラー女神がスヤスヤ眠っているのを見つけると、今がチャンスとばかり、赤ん坊ヘラクレスを抱き上げ、そっと近づいてヘーラー女神の乳首を吸わせました。赤ん坊とはいえ、ヘラクレスが乳を吸う力はとつても強く、びっくりして目を覚ましたヘラクレスを突き放してしまいました。その時、ヘラクレスに強く吸われたヘーラー女神の乳首からは、乳が勢い良くほとばしり出て星空にかかり、それはやがて天の川となって、ほのぼのと輝きはじめたのです。そのため、天の川は英語で「ミルキィ・ウェイ」、つまり、「乳の道」と呼ばれるようになりました。そして、射手座の南斗6星の部分は、そのミルクをすくうスプーンの形とみて、「ミルク・ディパー(さじ)」とよばれています。また、ヘーラー女神の乳首からほとばしる乳(gala=milk)は、銀河系の英名:Galaxyの語源にもなっていて、普通の銀河系もGalaxyと呼ばれています。

天の川が「島宇宙」であることが判ったのは20世紀になってからである。

最初にそのイメージを描いたのは、イギリスの天文学者ウィリアム・ハーシェル(1738-1822年)であった。彼は優れた技術で大口径の望遠鏡を製作して夜空の一定の範囲ごとに星の数を克明に記録した。その結果、天の川に沿った方向には星が集中し、天の川から離れるにつれ星の数が急減するということを確かめた。



ハーシェルが描いた天の川 <http://spaceinfo.jaxa.jp/ja/william_herschel.html>

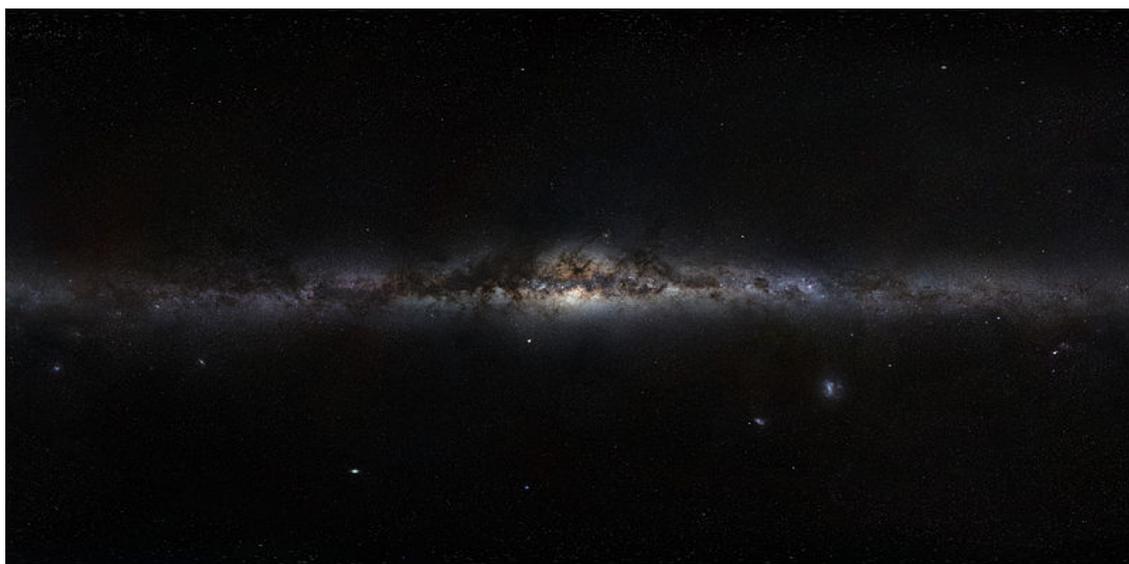
おそらく18世紀末に描いたものであろうが、現在の私たちとしてはいろいろな望遠鏡画像をみているから、なんとなく鯛みたいな形に失笑してしまうのはいたしかたない。しかしながら、彼の発想をうかがいみるに、天の川に沿って星々を観測したことから、天の川とは何物かという点にこだわったことは、歴史的にも初めての宇宙への果敢な挑戦であった。

² フリーク(Freak)とは、ある事柄に対して異常に心酔する者を指す。米国では病的マニアの意味合いが濃い。昨今の日本語では、語感はあるいがキチガイ・オタクに相当するかもしれない。

彼は 1781 年に太陽系第 7 惑星である天王星を発見したこと、惑星状星雲の名付け親であったことの方が有名である。今でいう DIY のオタクでもあり、当時としては巨大な望遠鏡を造り上げて観測したことも見捨て難い。そんな天文学者兼技術者が、なんとバロック音楽の愛好家でありながら作曲家でもあったことの方が、DIY にも趣味がある私には脅威になっている。曲の出来は別として、いや、彼の才能におびえているクラシック・フリークの私にはその曲すらバカにしている深層心理にあがいているのだが、その分「無知」状態に陥ってしまっている。だから、私はハーシェルが描いた天の川銀河の絵を見下すことは御法度になるとおもう。人間には認知できない心理動作がある。それは妬心であり、同類の異性間や同性間の人間同士に起きやすい。もっとも忌み嫌うべき暗闇に落ち込む心理重力なのだが、普段は己の中で働いていること自体に気付けない。気付くためには日ごろの活動で自信を付けないといけない。そして、いったん感知したら言動を正すべきだ。

それほど私たちに反省を迫る。ハーセルの多芸多才の広さと深さは尋常な人間の観察眼を超えて宇宙規模とも言える。

現在の天の川の実像



[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ESO_-_The_Milky_Way_panorama_\(by\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ESO_-_The_Milky_Way_panorama_(by).jpg)

地球から 360 度で観た天の川の写真である。当然ながら、何枚もの画像をつなげて制作されたものであるが、両端は絶対に見ることはできない。この画像は左右がつながっているから、鉢巻き状に巻いて見るのが現実的となる。どうしても観たい人はこの銀河を飛び出すほかなら、おそらく何十万光年の宇宙飛行、つまり光速の百分の一の秒速 3,000km で飛ぶことが出来たとしても数千万年かかる。なお、原子力電池を積んだボイジャー兄弟でも秒速 30km 程度であることを考えれば不可能ともいえる。百歩譲って光速で飛行できる宇宙船が開発されたとしても 10 万年以上もかかる。

天の川の規模は次のとおり。

直径:Diameter	100,000 - 180,000 光年
中心までの距離:Distance to Galactic Centre	27,000 光年
年齢:Age	136 億歳
恒星数:Number of Stars	1,000 - 4,000 億

直径 10 万光年もある天の川銀河の外観は、ほぼ永遠に観ることはできないから、他の銀河で連想するほかない。それは右画像の渦巻銀河：Spiral Galaxy NGC 891 になろうか。およそ 3,000 万光年先にある。HST の効力にはあらためて胸がふるえる。

これらの画像などから、天の川銀河の側面外観を想像して合成された CG 画像が次のとおり。ぼやけて光る雲は、一つ一つの恒星が集まってそのように見える。恒星は数千億もある。バルジ（胴体）の膨らみに多く集まって光彩を放っている。全体を包む雲のようにみえるものは“ハロー”と呼ばれる。黒い横に囲む太い筋は星間ガスや塵であり、横から見るから本来なら薄いのであるが、数万光年も重なって恒星の光を隠すほど暗くなっている。

Edge-On Spiral Galaxy NGC 891

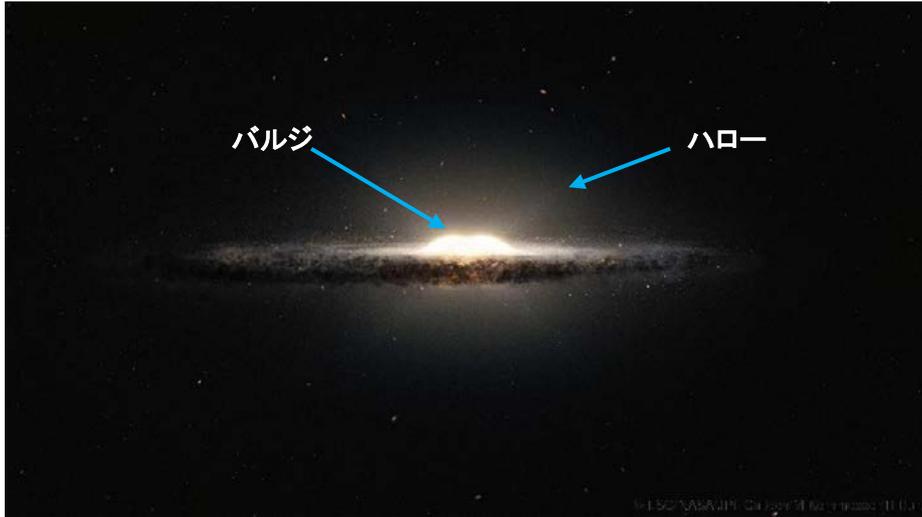


<https://apod.nasa.gov/apod/ap981220.html>

NGC 4565: Needle Galaxy: 5 千万光年先



<https://apod.nasa.gov/apod/ap990617.html>



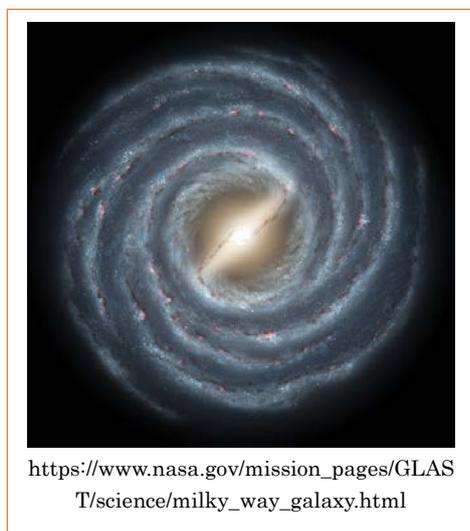
<http://www.bbc.com/earth/story/20151113-oldest-known-stars-found-at-the-centre-of-milky-way>

どうしても天の川銀河を真上から観たい、と切に願うのは人情である。横ばかりというのは情けない。それをほぼ解決してくれたのは、2006年鹿児島大宇宙物理学研究室の中西裕之准教授の研究成果である。電波望遠鏡で塵に邪魔されずに星間ガスの起伏を観測できた。

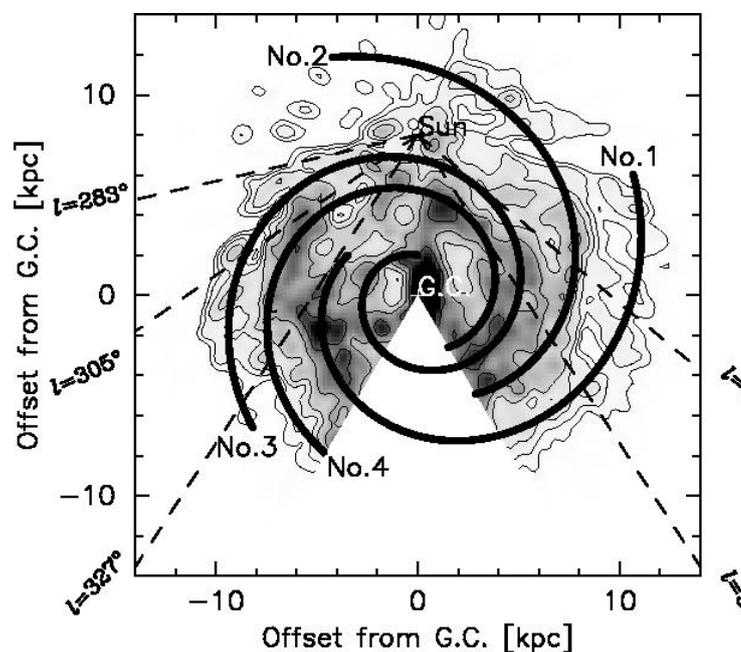
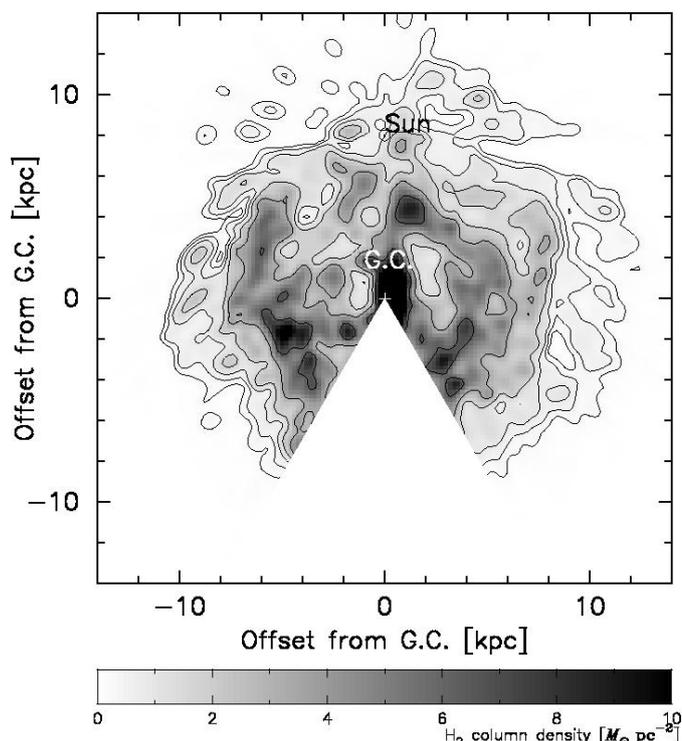
それが右図のとおりである。

欠けている部分は、太陽系から銀河中心に向かって電波でも見通せない所である。それに、かつて観測されていた天の川の腕を重ねてみたところピタリと一致したではないか。

NASAの想像図もあるから、それとも比較できる。想像は空想の域を出ないから、逆に中西准教授の成果がNASAの想像を裏付けたということになる。



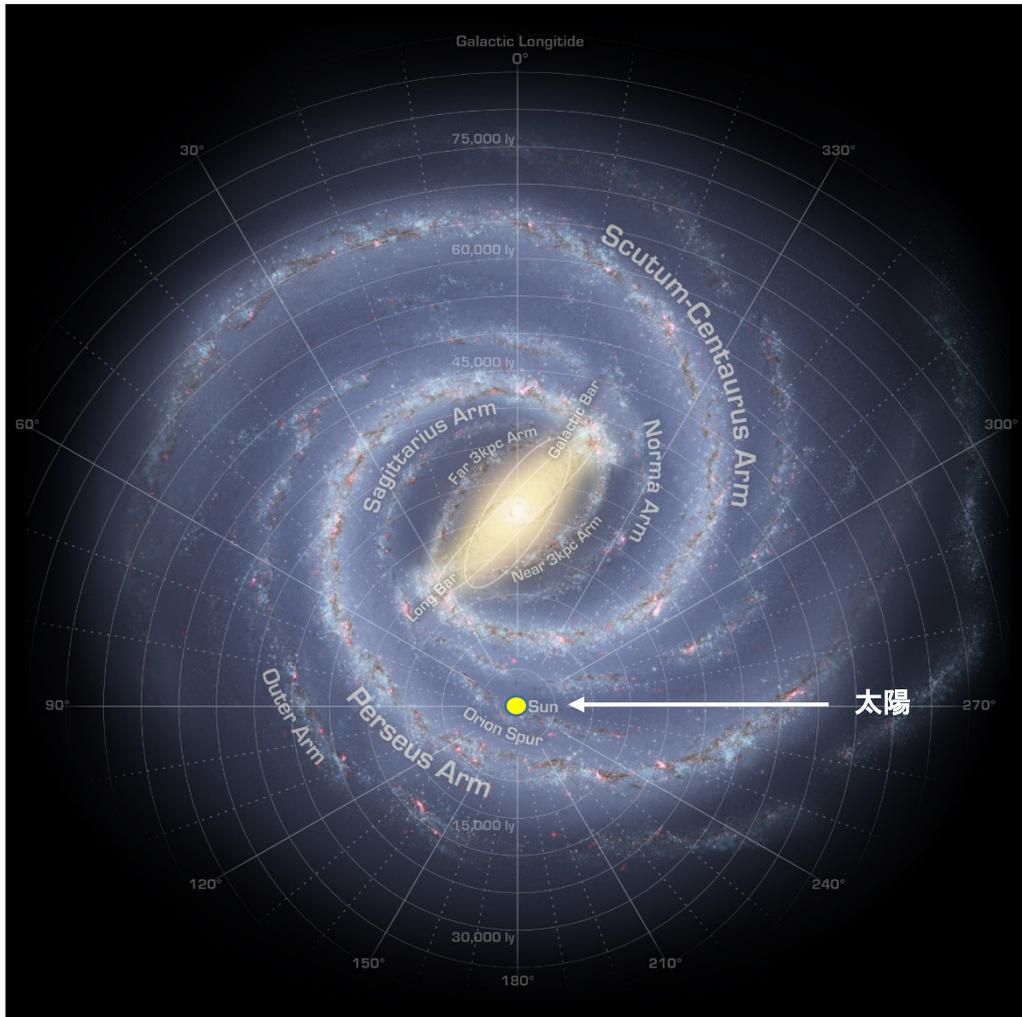
<http://milkyway.sci.kagoshima-u.ac.jp/~hnakanis/>



天の川の渦の腕については、1976年に初めてジョージリンら

(Georgelin, Y. M.; Georgelin, Y. P.)による観測結果に基づく提唱があり、それと比べた結果、ほぼ同じ線をたどっていることも判ったのである。天の川銀河は、渦巻銀河のうちで中心が棒状の渦巻銀河と言われてきている。これで、ようやく私たちの想像も実像に近づけ、なにも完全に不可能な、無理して天の川を出る必要がなくなった。半面、永遠に天の川に閉じ込められたまともいえる。

二つの渦状腕に巻かれる天の川: Two-Armed Spiral Milky Way



<https://apod.nasa.gov/apod/ap080606.html>

天の川の中から外を見ても、私たちの銀河の真の構造は識別しがたい。しかしながら、スピッツァー赤外線宇宙望遠鏡で大胆に観測努力を払うと、私たちは二つの主要な渦状腕で分別された大きな銀河に住んでいる。それらは、楯座-ケンタウルス腕とペルセウス腕であり、銀河中央の大きな棒から発する渦状腕である。事実、正面から私たちの銀河をのぞむには、遠くの銀河の天文学者たちから二つの腕をもつ銀河と見えるようにイラストされている。以前の観測から中央の棒状と四つの渦状腕が判ってきた。オリオン拍車と呼ばれる細い腕の中にあり、天の川の外側へ延びる三番目の河あたりに、天文学者は太陽を位置づけた。

エドウィン・ハッブル (1889–1953 年)

この広い宇宙における銀河は「天の川」だけという認識が、天文学者の間で常識の時代があった。20世紀初頭のことである。現在でも、銀河という言葉は聞いたことがあるという程度の人々も多い。天の川すら見たことがないという。嘆くことよりも、生活に関係なく、エンターテインメントという受身のテレビ娯楽番組に浸っており、こよなく楽しめることの方がなげかわしい。みずから創意工夫して創り上げる青年たちが多くない。

50年ほど前に、修学旅行に行つて法隆寺の大修理をみて触発された高校生がいた。私と同じ年である彼の名は「小川三夫」氏 (1947年～) である。当時、大棟梁の西岡常一氏 (1908–1995年) に感化されて22歳で内弟子入りしたという。何にも特技がない、大工の経験すら余りない若造を西岡氏は受け容れた。小川氏の情熱以上に、いっさいの既成技術や観念を持たないから、真っ白な和紙に向かう水墨画の画家のような気持ちを持ったのかもしれない。そう、西岡氏は既存の大工道具のほとんどを棚に上げて、飛鳥時代の原始的道具、鑿鉋 (やりがんな) や手斧 (ちょうな) などによる工作にこだわっていたからでもある。それほど、飛鳥の建築技法は彼に信頼されたということでもある。それから、あの薬師寺金堂再建: 1976年を経て、西塔再建: 1981年にはほぼ100%で飛鳥時代と同じ建築材「檜」と技術が使われた。これら歴史的な再建で小川氏は見事に副棟梁を務め、いまや、寺院建築では伝説的な技能を修めた棟梁として認められ活躍している。

ハッブルはこの逸話と一部似ている。師匠はいなかったが、彼は天文学においてはアマチュアだった。少年時代におもちゃとしてプレゼントされた小さな望遠鏡を覗いて夜空の観測に執着していた程度である。その彼が大学でこそ天文学を学んだが大学院で法律を修めて就職した。その後、幼少のころの夢が忘れられず、シカゴ大学のヤーキス天文台の観測業務に身を投じた。まもなく徴兵されて第一次大戦の前線に投入されたが、終戦間近で運よく恐るべき殺戮の現場からは遠ざかって彼の黒鷹連隊は激しい戦闘に出くわさなかった。

終戦後、帰ってくるときにウィルソン山天文台台長ジョージ・エラール・ヘール (1868–1938年) に手紙を書いた。それは天文台で働きたいという就職願書である。当時、1917年カリフォルニアのウィルソン山天文台に100インチ反射鏡を備えたフッカー望遠鏡が新設され、当時は最大級のもので米国民をにぎわせた。奇跡的に彼は29歳でその専門観測員におさまった。あの200インチ: 5m反射望遠鏡を備えたパロ



<http://www.thefamouspeople.com/profiles/edwin-powell-hubble-527.php>



ウィルソン山天文台

<http://www.saburchill.com/HOS/astronomy/036.html>

マ山天文台を1935年着工して1948年に完成されたが、その建設を推進したヘールの慧眼によるものだったのであろうか。ヤーキス天文台の台長もヘールで、そこでハッブルが観測に就いていたときに二人は相互に知り合っていたからにちがいない。

ハッブルの主な業績は、世界初のアンドロメダ銀河までの距離測定、諸銀河の分類、諸銀河の後退速度の発見の三つである。次にそれらを紹介する。

参考:望遠鏡の仕組みと種類

屈折望遠鏡

ガリレオの遠メガネに始まり、比較的小型で携帯型、移動型、設置固定型など幅広く活用されてきた。アマチュアにも愛用され、右図のほとんどのタイプが実用化されている。

反射望遠鏡(ニュートン式)

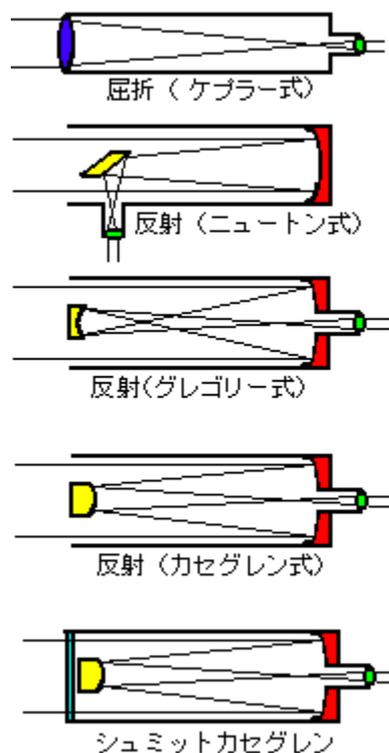
中型、大型様々であり、設置固定型が多く、ニュートンにより開発されて、多くの天文台で設置されている。口径が大きくなると重量がかさむから建設に多大なコストを要する。

例. ウィルソン山天文台の2.4m フッカー望遠鏡(下画像)

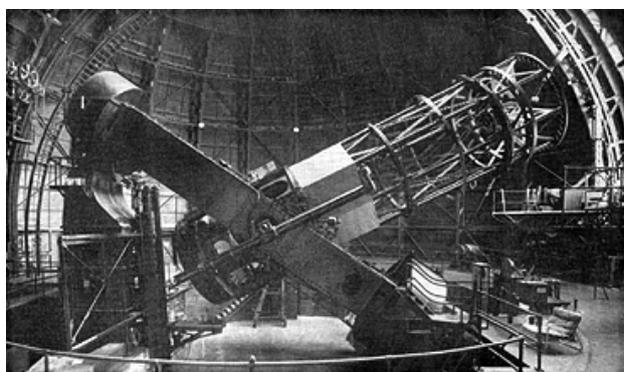
反射望遠鏡(カセグレン型)

このタイプは電波望遠鏡に多用されている。反射鏡の口径を大きくすれば解像度は上がるが、大規模となる。ただし、反射鏡は金属製でガラスの鏡面加工も、天文台ドームも不要となり、全天候型で設置できる。

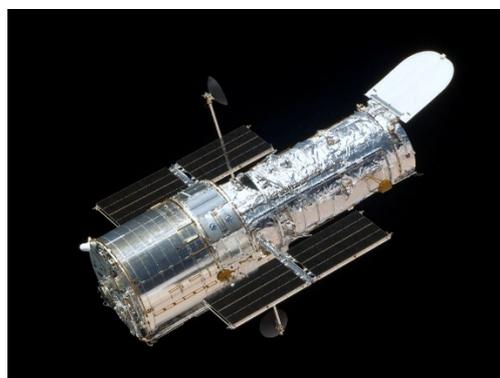
例. 国立天文台 野辺山 45m 電波望遠鏡



<http://www.aurora.dti.ne.jp/~mrkei/astro/telescope.htm>



ハッブルが愛用したウィルソン山天文台の当時世界最大のフッカー望遠鏡; ニュートン式反射望遠鏡
<https://apod.nasa.gov/apod/archivepix.html>



ハッブル宇宙望遠鏡:HST

https://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/story/index.html

(1) グレート・ディベート：大いなる論争

ハッブルの着眼は、当時の天文学界で起きた火花を散らす「シャプレイとカーティスの議論」に発したといわれている。1920年、二人の著名な天文学者ヒーバー・ゾースト・カーティスとハーロー・シャプレイの間で「グレート・ディベート：The Great Debate」と呼ばれる論争があった。それは、メシエなどのカタログにある銀河や星雲が天の川の内にあるのか外にあるのかという論争であり、それぞれが大変な実績のある天文学者だったから皆が目を丸くして注目した。この論争は学会報の紙面でも行われ続けたといわれている。

ハーロー・シャプレイ：Harlow Shapley (1884 - 1972)

ヒーバー・ゾースト・カーティス：Heber Doust Curtis (1872 - 1942)

科学者どうして永遠に折り合わない議論は、1930年の第6回ソルヴェイ会議（於：ブリュッセル）にてアインシュタインとニールス・ボーアの間で起きた激突事件がある。不確定性原理など量子力学の確率論に対して、アインシュタインは真っ向から否定した。KO寸前でも譲らずに量子論を擁護してかろうじて反論しつづけたボーアであったが、決着がつかない消耗論争で、二人とも二度と顔を合わせたくないほどになってしまった。議論後にアインシュタインを嘆かせ、「それでも神はサイコロを振りたまわず」と捨てゼリフを吐いた。これは余りにも有名である。しかしながら、現在までの理論の発展と実証結果から、確率変数を扱う量子論は正確きわまりないことが判ってきている。

次に、1950年代の米国プリンストン大学のガモフの膨張宇宙説に対向したケンブリッジ大学のフレッド・ホイルの定常宇宙論である。これも大論争を物理学界で巻き起こし、ラジオ放送局が特集したほどであった。そこでインタビューされたホイルが「あんなのただの“ビッグバン（大爆発）”みたいなもの」とけなしたことが、ガモフの説は「ビッグバン」として定着してしまった。皮肉なものである。敵の仮説をバカにしたことが、敵に塩を送ってしまったのだ。期せずして、ガモフ側は、“ビッグバン”という値千金のPR用語を手に入れたのだから、次第に満悦したにちがいない。すなわち、予言がいくら理論的であっても、それに忠実な科学界でさえプロパガンダにはキャッチ・フレーズが必須なのである。次回にこの論争を大いに語りたい。

さて、大銀河系を主張するシャプレイと、星雲宇宙の存在を主張するカーティスとの論争である。それは、アンドロメダ星雲などが天の川の内にあるのか外にあるのかという激論であった。シャプレイは、セファイド変光星と球状星団の観測と距離測定に実績を持ち、カーティスは「クロスリー反射鏡による撮影された762個の星雲と星団に関する報告」で勇名を馳せていた。いずれも甲乙つけがたいが、アンドロメダのような渦状星雲は島宇宙であり、天の川の外にあるというカーティスの主張に譲らなかったのがシャプレイである。ワシントンの科学アカデミーの講堂で行われたが延々と平行線をたどり、決着はつかなかった。議題は次のとおり。

- (1) 天の川銀河系の規模と構造
- (2) 渦状星雲と宇宙の構造

シャプレイの論点	カーティスの論点
大銀河系説(天の川こそ唯一)	島宇宙説(天の川も一つの島宇宙)
セファイドと球状星団の観測と研究	762 個の星雲と星団の観測と研究
銀河系は扁平な恒星系である。	銀河系はレンズ状で、中心の厚みはその 6 分の 1 程度である。
銀河面の直径は 30 万光年に達する。	銀河系の直径を約 3 万光年と見積もった。
太陽は銀河系の中心から遠く離れている。	太陽はほぼ銀河系の中心に位置する。
渦状星雲は銀河系外の天体であろう。しかし、銀河系ほど大きな恒星系ではない。 これが大銀河系の提唱である。	渦状星雲以外(恒星、星団、散光星雲、惑星状星雲)はすべて銀河系内。 アンドロメダ星雲までの距離を 50 万光年と推定。これが島宇宙説である。
ウィルソン山天文台:2.4m 反射望遠鏡	リック天文台の:91cmクロスリー反射望遠鏡

用語について

「銀河」とは、天の川銀河を指すから、大銀河とは天の川が最大の宇宙という意味。

「星雲」とは、一般にぼやけたネブラを指す。

「渦状星雲」とは、アンドロメダのような渦が巻いているネブラをいう。

<参考> 恒星天文学の源流【22】 星と銀河 5 ～銀河系と渦状星雲～ 小暮智一

http://tenkyo.net/kaiho/pdf/2012_07/03rensai-01kogure.pdf

ハッブルはこれらの論争をつぶさに傍聴した結果、いずれも「距離測定ができていない」ことに着目して、己の観測目標を定めたのである。また、彼の感光鋭い耳目の写真乾板には「セファイド変光星」という標準灯が焼き付いた。

なお、用語については、当時から現代へと意味の違いが次のとおり変遷している。

物理的な集合天体	1920年代	現在
ガスやチリの雲	星雲 (ネブラ)	星雲 (ネブラ)
無数の恒星の集団		銀河 (ギャラクシー)
無数の恒星の渦巻集団	渦巻星雲	渦巻銀河
恒星の塊り	星団 (クラスター)	星団 (クラスター)

主な違いは、天体望遠鏡の感度と分解能の発達によるものであり、アンドロメダが銀河すなわち天の川と同じとは思えなかったからでもある。ハッブルが手にした望遠鏡は 2.4m 口径で当時は世界最大のものだったことも幸いしていた。ハッブルの大発見以来、すみやかに 200 インチ (5m) のヘール望遠鏡がジョージ・エラール・ヘールによりパロマ山に建設されたことでも理解できよう。

典型的な星団の画像を以下に掲げる。

右の鮮明な望遠鏡画像で解るように、球状星団オメガ・ケンタウリ (NGC 5139) は 15,000 光年先にあり、拡がり は 150 光年である。およそ 1 千万の恒星が詰まっている。いずれも太陽よりも年老いている。私たちの銀河に於いて最大の星団で、天の川の銀河のハロー（ふくらみ）域にある。多くの星団は同じ歳の星々から成るが、この不可解な星団は歳がばらけて豊富な化学的組成をもつ異なる恒星を見せてくれる。天の川に混成された小さな銀河核の名残かもしれない。

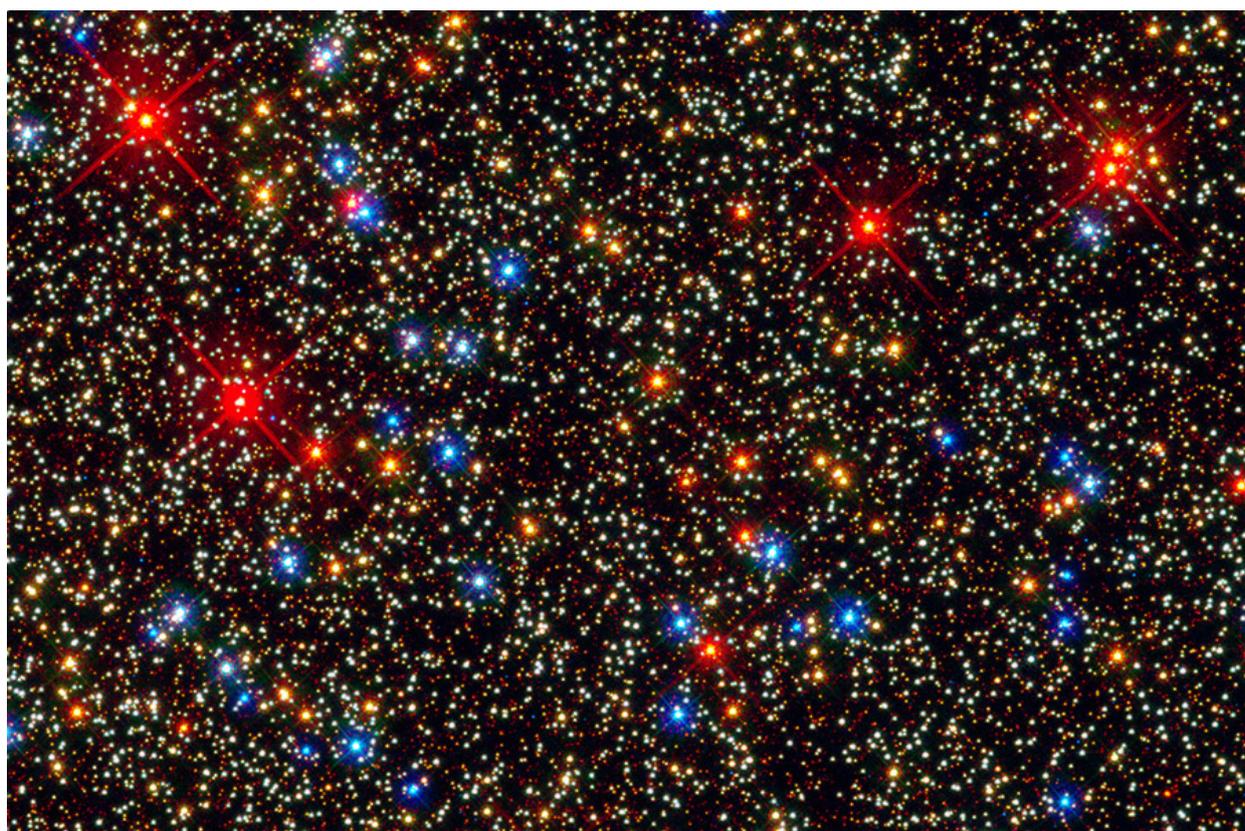
球状星団オメガ・ケンタウリ



<https://apod.nasa.gov/apod/archivepix.html>

球状星団オメガ・ケンタウリの中心部（宝石の玉手箱）

<https://apod.nasa.gov/apod/archivepix.html>



恒星の衝突の後に何が残るのか？ この質問への答えを助けるために、天文学者は天の川銀河の星々が集まった重量級の球の中心部を研究してきた。このオメガ・ケンタウリ星団の核は太陽の 1 万倍も詰まっている。上の画像は、新たに精度向上したハッブル宇宙望遠鏡：HST が中心部の星々を分解している。太陽より小さくて白い黄色の星がたくさん見える。いくつかの

オレンジ色の星は赤色巨星があり、ときたま青色星がある。二つの星が衝突するとき、一つの大きな重い星になるようであり、または二連星を形成する。近接する二連星は、時には紫外線やX線を出す。つまり、ガスが一つの星の表面から白色矮星や中性子星のコンパクトな連れ合いに流し込むときである。オメガ・ケンタウリの芯にそのような二連星が二つある。

この球状星団はケンタウルス座の方向で 15,000 光年先にある。

(2) アンドロメダ銀河までの距離

誰もが知っている銀河である。でも、科学的にメスを入れた人はハッブルが初めてではないだろうか。その方法が、第2回に掲げたヘンリエッタ・リーヴィット女史 (1868-1921) が研究した「セファイド」(右図)の活用である。変光星というのは、光度・変光周期がある種に限れば一定になるという特徴がある。変光周期が固定されると見つけやすい。

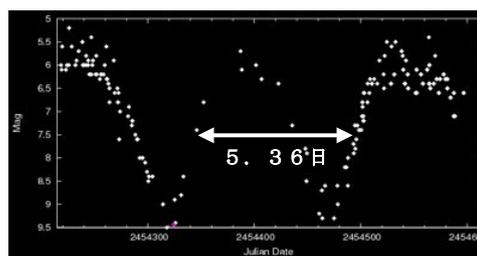
次に見かけの明るさ、すなわち実視等級を測定すれば絶対等級との差分により距離が推定できる(第3回参照)。ただし、太陽系に近いところでセファイドの絶対等級が測定されていなければいけない。ここまでが彼女の大きな功績であった。

ハッブルは、ウィルソン山天文台に就くと、すみやかにアンドロメダ星雲の観測を始めた。

天文学者という人達は夜行性である。あるいは夜更かしがこよなく好きな人種かもしれない。いまでは夜の仕事に携わる多くの様々な人々がいるから、私たちは何とも思わない。

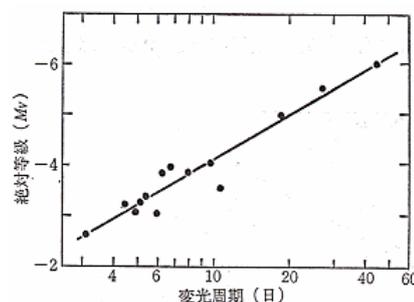
彼は、しかし、徹夜の観測がいくら続いても、彼の観測目的への執念が萎えることにはならなかった。しかも、凍てつく冬の夜でも手指がかじかんでも平気だったそうだ。当時の天文台は大きな反射鏡のために観音開きのドームは、夜気と寒気を同時に運んでくる。

ケフェウス座の δ 星(セファイド)



<http://earthsky.org/?p=3758>

セファイドの絶対等級・変光周期の関係



<http://www.geocities.jp/planetnekonta2/hanasi/distance/distance.html>



http://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/variable_cepheids.html

現在のようにCCDカメラを仕掛けてエアコンがきいた別の観測室でワークステーション画面を覗くような温室での観測ではなかった。緯度（赤緯）も経度（赤経）も天体に合わせるためクルクルとハンドルを回すこともなく、とくに経度は、水銀プールに浮かんだ台座がモータードライブになっており、地球の自転をなぞって秒角単位で寸分たがわず設定できる。さらに、星を指定の倍率で追跡できる精緻なメカニズムをハッブルがみたら愕然とするはずだ。しかも、プログラムができるから観測スケジューリングの自動化もできる。

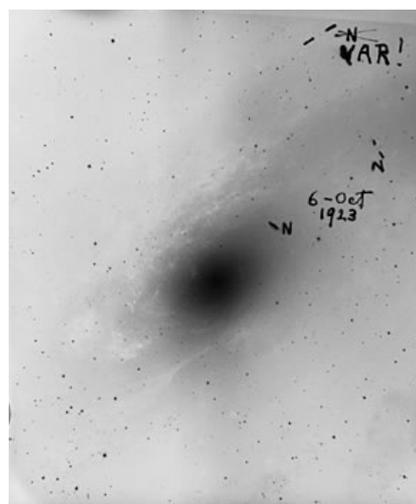
膨大な観測されたデジタル画像データはすべてアーカイブ蓄積されて、いつでも目的画像を取り出して調べることができる。凄まじい現代テクノロジーである。

私たちは、当然と思うだろうが、同じような労苦を伴う天文観測のアマチュアでないとおそらくハッブルがなめた辛酸はわからないのではないか。それほどの違いがある。だから、彼はひょっとしたら古代原人のような頑健な身体を備えていたのであろう。ちなみに彼は 1m93cm の長身で大学時代は陸上競技の選手で活躍していたほどの身体能力を有していた。

そして、主にアンドロメダ星雲：M31 を中心として系外と思われる星雲の写真の撮り続けて数百枚の乾板を積み上げていたのである。それぞれ専用ルーペを使ってひたすらに克明に画像を分析しながら。

ついに、4年目の1923年10月6日、M31のいくつかの乾板上に変光星（右図）を発見した。とにかく雲のような星雲の渦の中に明るさが変化しているのに気付いた。思わず“VAR”と変光星（variable star）を意味する文字を書き込んだ。これを確実にするために、天候が良くなる次の年の2月まで待って晴れ上がったときに6夜連続でつきっきりで観測したという。凍てつく夜に。その結果、明るさがみるみる上がって、光度変化の確証を掴んだのだ。あたかも、狙った大物、例えば馬なみのヘラ鹿（北米）が現れるまで寝食に耐えてじっと待つ猟師のようであった。その執拗さは尋常でない。4年も待つことに耐えきったのだから。やはり世紀の大発見をするには、凄まじい忍耐で精神力と体力の消耗をしなければならない。それに「初心、忘るべからず」どころか鋼（はがね）のようなその決意は凄絶ともいえる。

アンドロメダ星雲内の変光星(右上)



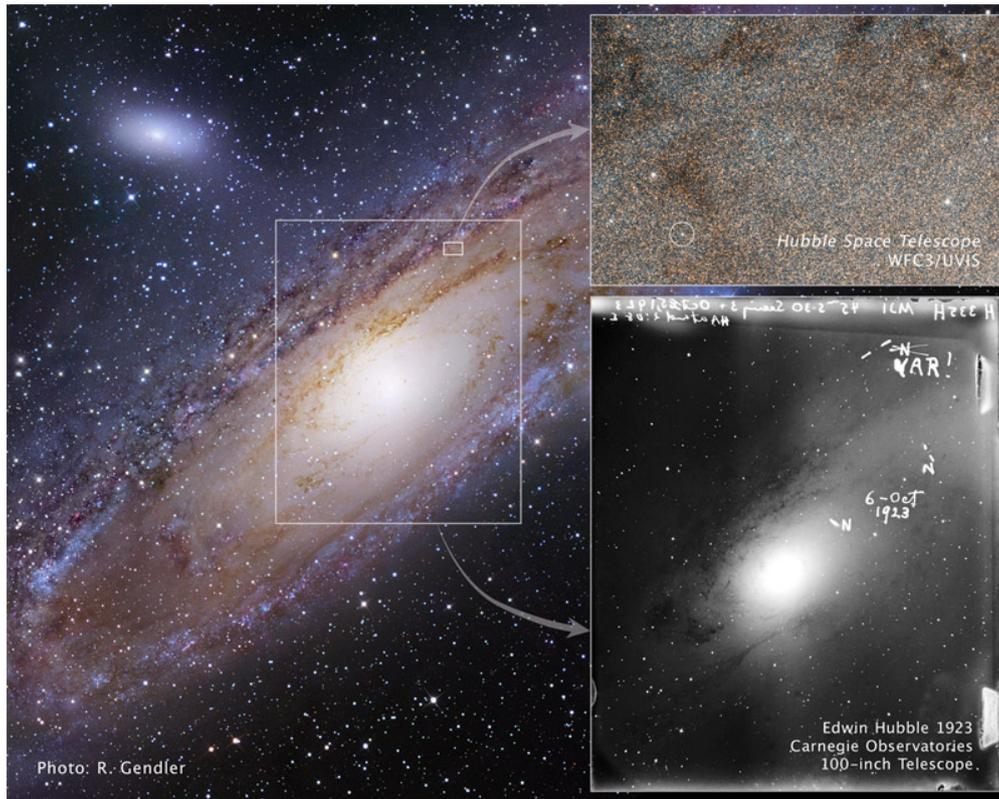
<http://amazingospace.org/resources/explorations/groundup/lesson/basics/g48/>

ハッブル撮影の画像(長時間露出)



https://cosmictimes.gsfc.nasa.gov/online_edition/1929Cosmic/andromeda.html
Image credit: Hubble, ApJ, 69, 103 (1929)

NASA の APOD : Astronomy Picture of the Day より



<https://apod.nasa.gov/apod/archivepix.html>

その変光周期は、**31.415 日**であった。

アンドロメダまでの距離：Dは**90万光年**と計算できたのである。周期：tからセファイドの絶対等級：Mが求められ、実視等級：mが観測されれば、次の公式で計算ができる。

$$\text{Log}D=0.2(m-M)+1 \quad (\text{種族 I セファイド})$$

ハッブルが気付いていなかった種族 II セファイドについては、絶対等級：M=0.1-3.0 Log t となる。これらの種族 I と II については後に述べる。

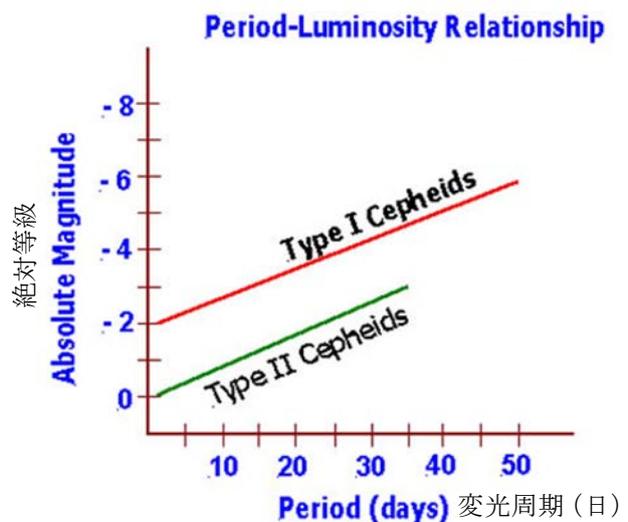
[種族 I の計算例]

周期=30日、実視等級=22、

絶対等級は-4となり、

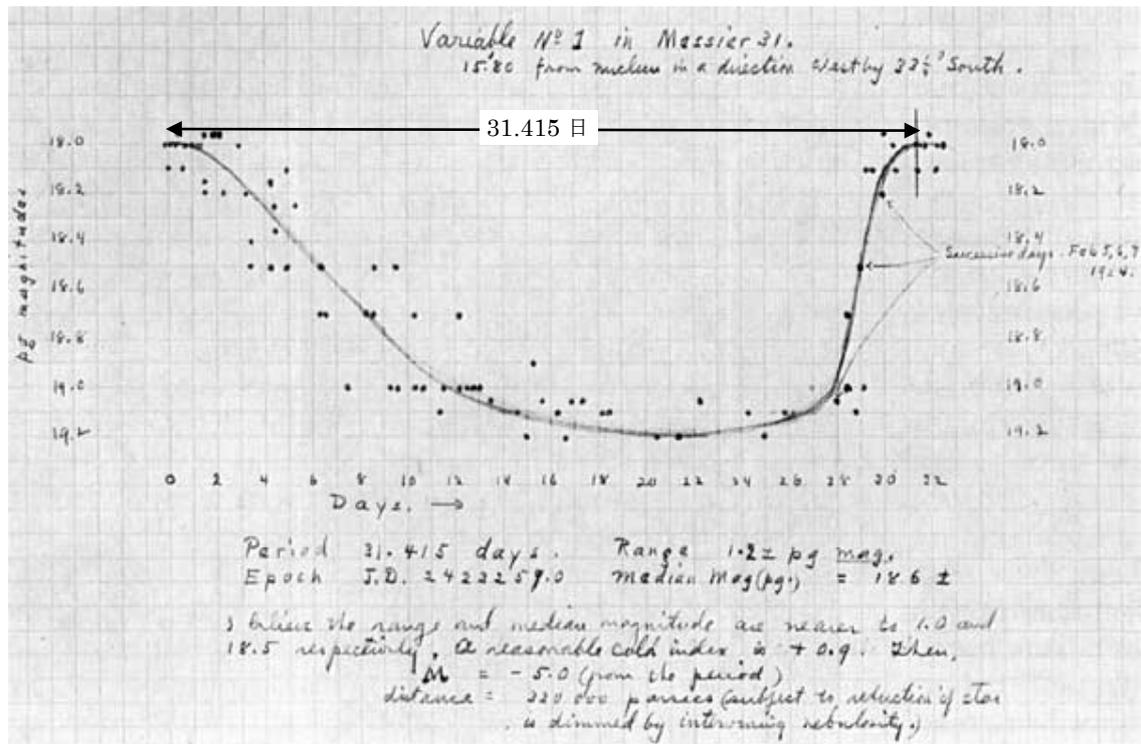
$$D=10^{0.2(22-(-4))+1}=10^{6.2}=1,584,893 \text{ pc}$$

$$= 5,166,751 \text{ 光年 (約 500 万光年)}$$



http://astro.hopkinsschools.org/course_documents/stars/stellar_distances/cepheid_variables/cepheids.htm

ハッブルは、下図のような変光周期のグラフを克明に記録していた。



エドウィン・ハッブルによりアンドロメダ星雲 M31 で発見された最初の変光星の光度曲線。これを用いて彼はその星雲の距離を決定できた。ハッブルは、1924 年 2 月 19 日、ハーロー・シャプレイへの手紙の中に同封した。

<http://history.aip.org/history/exhibits/cosmology/ideas/larger-image-pages/pic-island-luminosity-curve.htm>

彼は喜び勇んで、大銀河系説（天の川こそ唯一）のシャプレイに詳細な論文的な手紙を書いた。その中で観測結果を明らかにした。シャプレイはかつてリーヴィットがセファイドの距離スケールを定めるのに力を貸したことがあった。結果としてシャプレイはハッブルの手紙に首（こうべ）を垂れ、「この手紙で私の宇宙は壊されてしまった」と嘆いたようである。しかしながら、やはり真っ当な科学者である。シャプレイはきっちりと返事をしたため、

「アンドロメダ大星雲の方向にある変光星に関する貴殿の手紙は、長年、私が見た論文の中でも最も衝撃的なものでした。」

と、明快でも忸怩（じくじ）たる感想をハッブルに贈った。

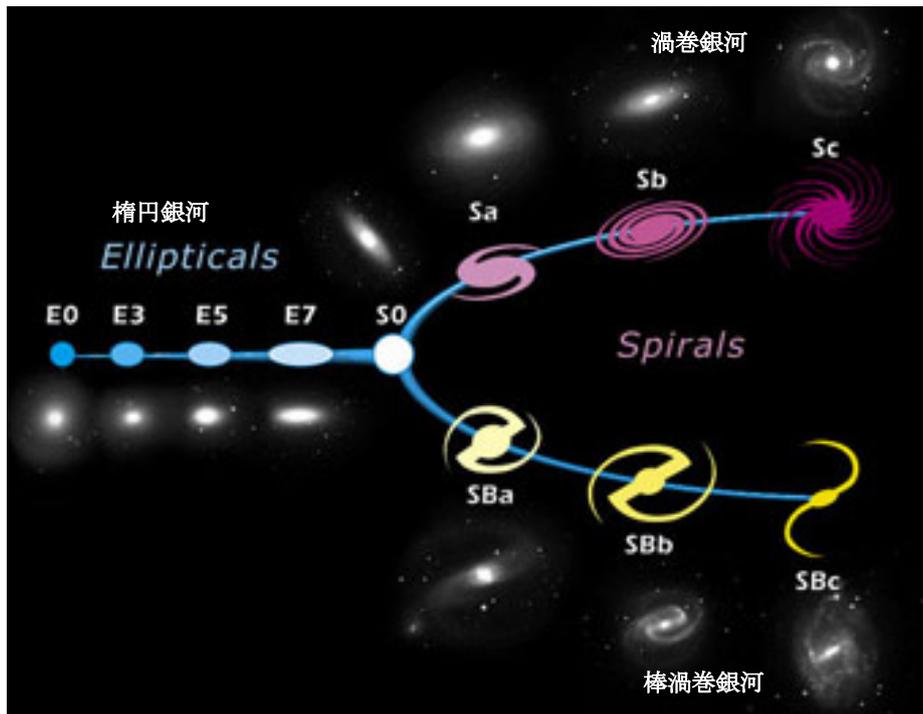
こうして、アンドロメダ大星雲に係るグレート・ディベートに決着がついたのである。

(3) 銀河の分類

ハッブルは、1923年7月に数百枚の銀河の写真から、次のように三種に分類した。

銀河	● 渦巻銀河	○ 渦巻銀河(一般)	[例] M31:アンドロメダ銀河
		● 棒渦巻銀河	[例] 天の川銀河
	● 楕円銀河		[例] M87
	◎ 不規則銀河		[例] 大・小マゼラン矮小銀河

これらのうち●のついた三種の銀河が次図のように体系化された。ただし、銀河の進化プロセスを示したものではないが、部分的にはそれが肯けるようだ。ハッブルの苦心作でもある。



<http://www.seasky.org/space-exploration/astronomers-edwin-hubble.html>

この体系図については、1925年の国際天文連合第2回総会で、「ハッブルの分類体系は物理的にまだよく判っていない星雲の進化の概念に基づいている」として公式には認めないことになった。ところが、フランスの科学誌でハッブルの分類が称賛され、一般には浸透していったという。大衆の感覚というのは、今も昔も、全体的な印象に基づいてプロパガンダの潜在エネルギーにより染み込んでいくのだから、抗しがたい。理屈を超えている。

これらの状況をみたハッブルは、国際天文連合星雲部会に、数百枚の写真のうちほとんどが対称性を持ち、不規則銀河は3%にすぎないという論文を送付して、何らかの進化の実態をはらんでいと訴えた。が、現在の銀河進化論では否定されている。

それでもハッブル体系図は、特に教育等の現場において多用されてきている。これはひとえに銀河全体が鮮やかな絵図として描かれたからであろう。進化論さえ除けば、俯瞰できるメリットには逆らえない。ハッブルに絵画的才能もあったことに驚いてしまう。

[主な楕円銀河] <https://apod.nasa.gov/apod/archivepix.html>



M 87

方向: おとめ座銀河団
距離: 約 5,000 万光年
大きさ: 12 万光年
中心: 巨大ブラックホール



M 110

方向: アンドロメダ座
距離: 260 万光年
大きさ: 15,000 光年



M 60

方向: おとめ座銀河団
距離: 5.400 万光年
大きさ: 12 万光年



M 64: The Sleeping Beauty Galaxy

方向: かみのけ座
Coma Berenices
距離: 1,900 万光年
大きさ: 4 万光年



NGC 2841

方向: おおぐま座
Ursa Major
距離: 4,600 万光年
大きさ: 15 万光年



M63: The Sunflower Galaxy

Sb-type spiral galaxy
方向: りょうけん座
Constellation Canes Venatici
距離: 3,500 万光年
大きさ: 6 万光年



M74: The Perfect Spiral

方向: うお座
Constellation Pisces
距離: 3,500 万光年
大きさ: 9.5 万光年



NGC 7742

方向: ペガサス座
Constellation Pegasus
距離: 7,200 万光年
大きさ: 3 千光年
中心に巨大ブラックホール



M51: Cosmic Whirlpool (渦)

The Big Dipper: 大柄杓
方向: りょうけん座
Constellation Canes Venatici
距離: 3,100 万光年
大きさ: 3 千光年
伴銀河: NGC 5195



M104: The Sombrero Galaxy

ソンブレロ銀河

方向: おとめ座

Constellation Virgo

距離: 2,800 万光年

大きさ: 5 万光年



NGC 4565: Galaxy on the Edge

方向: かみのけ座

Constellation Coma Berenices

距離: 3,000 万光年

大きさ: 10 万光年



M83: The Thousand-Ruby Galaxy

方向: かみのけ座

Constellation Hydra

距離: 1,200 万光年

大きさ: 4 万光年

[主な棒状渦巻銀河] <https://apod.nasa.gov/apod/archivepix.html>



NGC 1300

方向:

エリダヌス座

距離:

7,000 万光年

大きさ:

10 万光年



NGC 1073

方向: くじら座

距離: 5.500 万光年

大きさ: 8 万光年



M95

方向: しし座

Constellation of the Lion

距離: 3,800 万光年

大きさ: 5 万光年

(4) ハッブルの法則と膨張宇宙

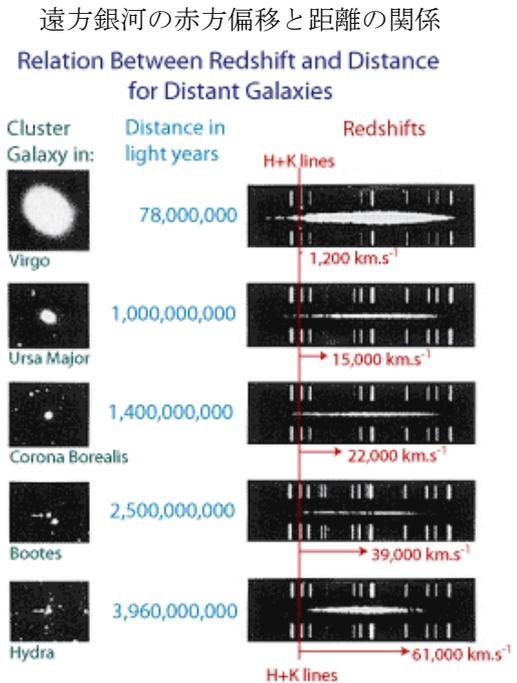
“The Expanding Universe & Hubble’s law”

<<http://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/cosmicengine/hubble.html>>

ハッブルは観測助手のヒューマソンの手を借りて、フッカー大望遠鏡により天文学者スライファー(1875 –1969)の実績を拡張した。長時間露出でかすかな銀河のスペクトルを撮った。標準アーク灯で得られるスペクトル輝線の偏移をたくさん観測することにより、彼は銀河の速度を計算することが出来たのである。いくつかの近隣銀河は天の川に向かってくる速度を持っており、それらはいわば後退速度を意味する赤方偏移でなく青方偏移であった。故に、銀河の多くは私たちの銀河から遠のいていることが明らかになった。彼は、より小さな銀河の画像ほど赤方偏移が大きくなっていることを見つけたのである。

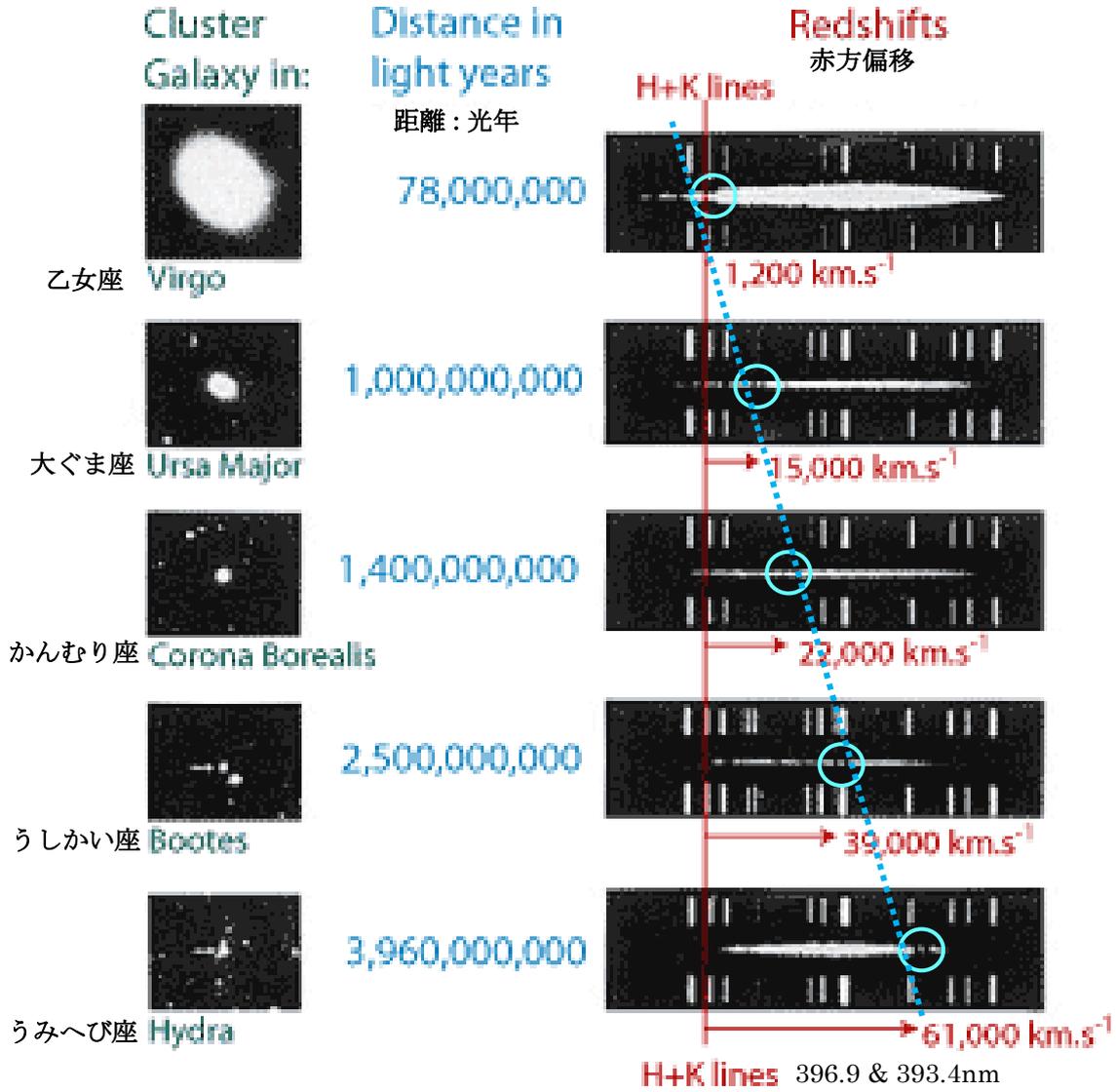
彼が観測した画像とそのスペクトルについては右図に掲げるとおり。

拡大してみると、次頁のようになり、吸収線が右に偏位していることが明瞭である。

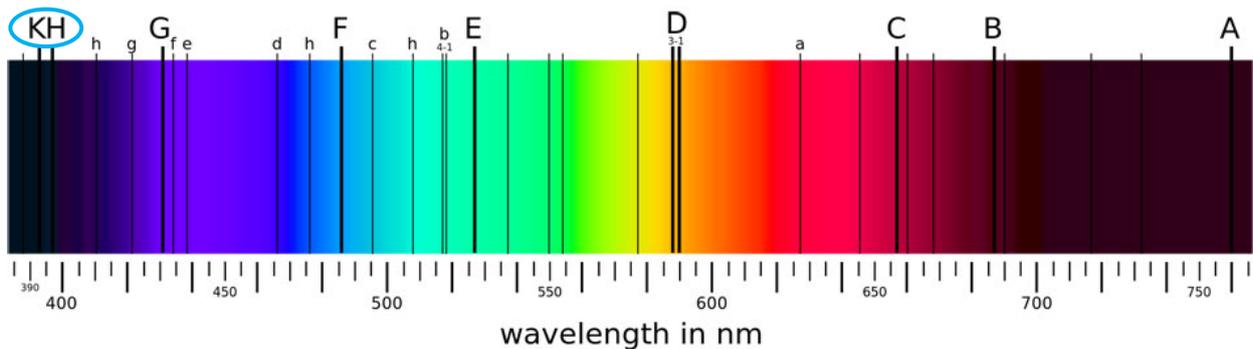


遠方銀河の赤方偏移と距離の関係

Relation Between Redshift and Distance for Distant Galaxies

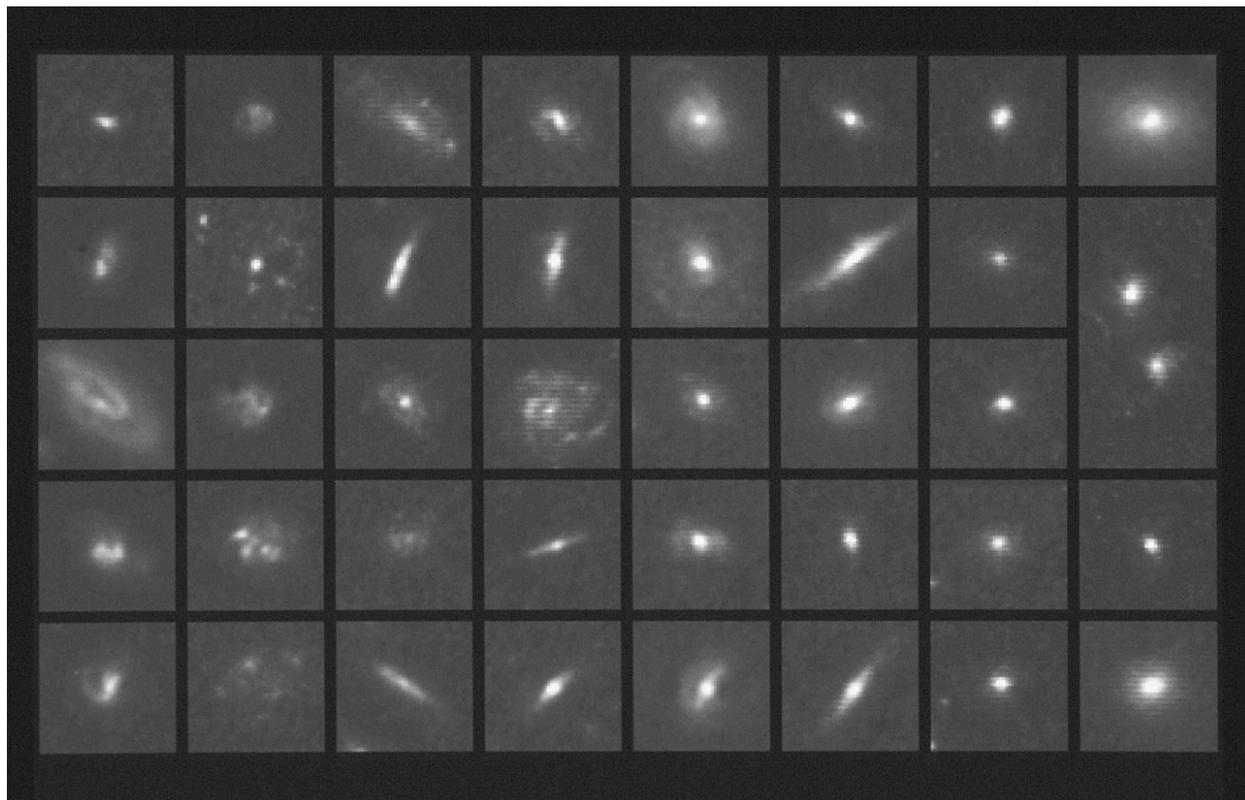


http://www.daviddarling.info/encyclopedia/H/HK_lines.html



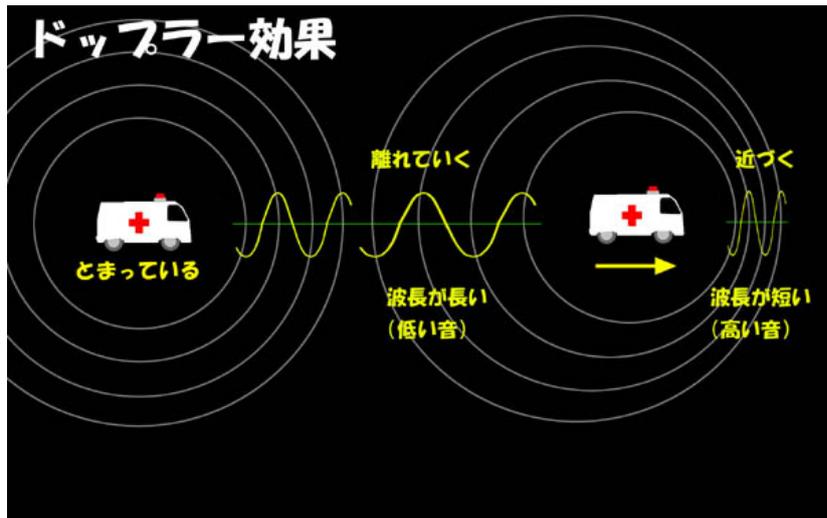
“H+K lines”とは、カルシウム・イオンの吸収線（暗線）が、フラウンホーファーの太陽光のような恒星が発するスペクトルの最左端の紫外線域のそばに出るものである。名付け親はフラウンホーファー自身という。波長は 3969 & 3934 Å（オングストローム）で、ナノメートルすなわち 10^{-9}m 単位では 396.9 & 393.4nm となる。

ハッブルが実際に観測した銀河の写真集“Hubble Atlas of Galaxies”に載っているものは次のとおりであり、前掲の赤方偏移の観測はこれらの写真を撮るときの分光分析により得られていた。



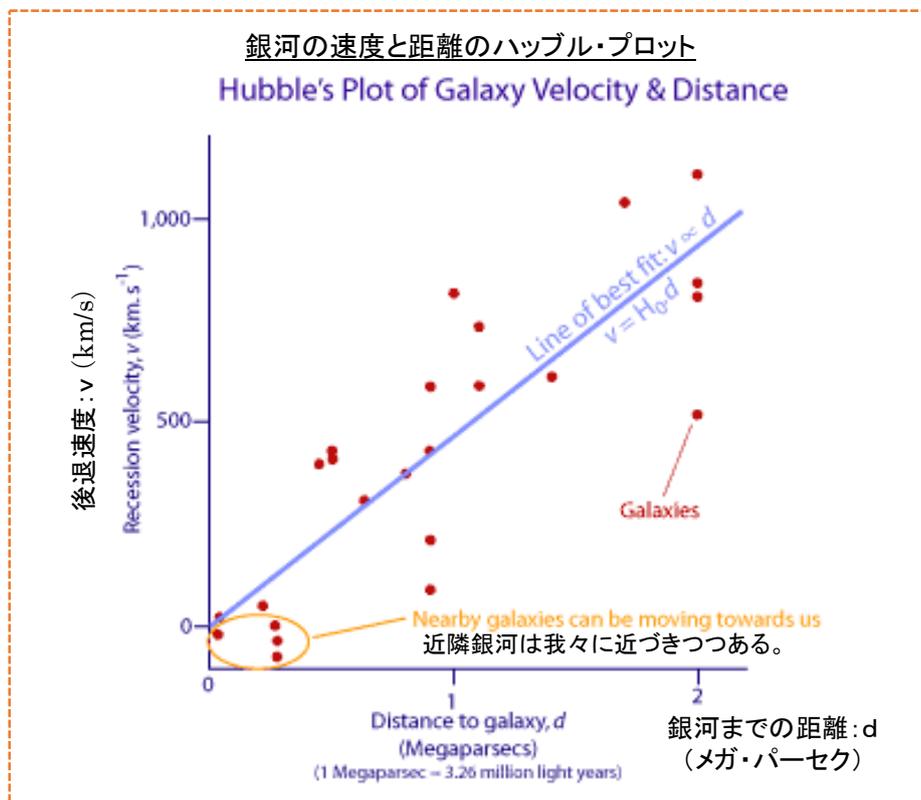
<https://www.spacetelescope.org/images/opo9228c/>

<参考> 銀河の光の赤方偏移：ドップラー効果



http://kodomo123.ec-net.jp/biz/tsu_wkk/rekishi/rekishi_4.htm

ハッブルの銀河観測は、それらの赤方偏移のスペクトル線で示されている。彼は、銀河はサイズが小さいものほど遥かに遠いことからお互いに似通っているものと推定した。距離に応じて銀河の速度をプロットすることによって、興味深い関係が浮かび上がった。これが「ハッブルの法則」として知られ、それを次図に掲げる。



ハッブルの原データに基づいた銀河の距離・速度関係
これは「ハッブルの法則」として知られ、膨張宇宙の証拠として解釈されている。

上図のプロットを調べると、より遠い銀河ほど平均的に私たちから速く後退していることが分かる。実際、ハッブルは上図の薄い青線のように、彼のデータにおいて、線形の関係が当てはめられることに気付いたのである。この直線の傾斜は、**ハッブル定数： H_0** として知られている。

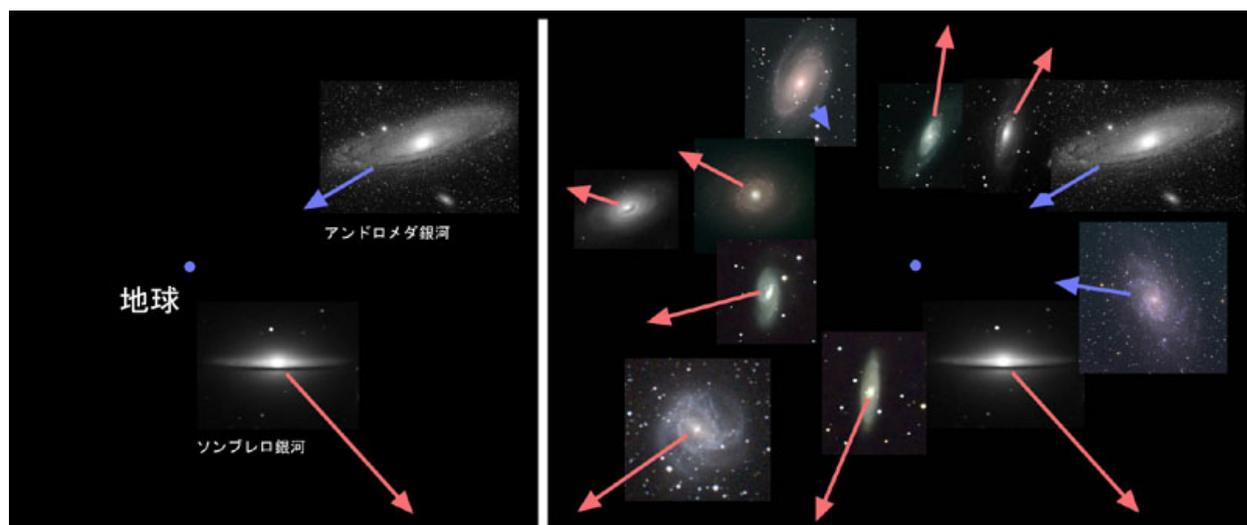
この関係は数学的に次のように表される。

$$v \propto d \quad [v: \text{後退速度、} d: \text{銀河までの距離}]$$

すなわち、 $v = H_0 d$

1929年に発行されたハッブルの速度・距離関係は、局所銀河団内での重力効果を超えていることが分かるから、銀河がそれぞれに離れつつあることを提言している。離隔しているだけでなく、もっと遠い銀河はより速く遠ざかっていることが明らかとなる。

そして宇宙は広がっており、今やそのデータが最も広く受け容れられている確かな解釈である。その関係性から浮上する他の要点は、時間を戻せば銀河は互いに近づいているにちががなく、宇宙空間はより小さかったことである。更に十分に過去に振り返るなら宇宙はとある一点に集束してしまうであろう。



http://kodomo123.ec-net.jp/biz/tsu_wkk/rekishi/rekishi_4.htm

もし、 H_0 が現在の膨張宇宙速度の値を逆数にしてみれば、 $1/H_0$ は定率で広がる宇宙の年齢の尺度となるハッブル・タイムとなることを告げている。

ハッブルは H_0 の値を次のように計算した。

約 500km/s/Mpc

1Mpc(メガ・パーセク)は 3.26 百万光年である。天文学者は距離尺度に光年よりむしろこのパーセクの単位を使いたがる。パーセクとは、本編第 2 回で述べたようにもともとパーセコンドの略で年周視差が 1 秒角になる天体までの距離であり、3.26 光年である。その百万倍がメガ・パーセクとなる。

この結果、宇宙の年齢は 20 億歳と見積もれたが。

地球の年齢が放射能試料分析で判明した30～50億歳とか、他の星の年齢に関する証拠により即座に否定された。しかしながら、ハッブルの宇宙年齢は奇しくも究極の問題を惹起したことは後で述べるが、当時は明らかにジレンマである。つまり宇宙はその中にある恒星や惑星より若くなることはできない。この問題は、たまたまセファイド周期・光度関係が見直されて再較正されたことにより宇宙年齢は100～200億歳と判りだした1950年代に解決した。

今日、天文学者たちが H_0 の正確な値と宇宙年齢をより克明に決定することに膨大な時間を費やした。その年齢は、実際、どんなモデルが宇宙地図として想定されるかということに拠っている。つまり、平坦で開放的か閉鎖的かである。最近のプロジェクトは手法の適用域を含めて、データ較正のためにセファイド観測に頼るだけではない。

NASA は、2001年にダブルマップ (WMAP) 探査のために宇宙電波望遠鏡を打ち上げて、宇宙マイクロ波背景放射 (CMBR) 計測を実施した。これによる見積と、他の実測や理論を併せて、現在は、標準値として

宇宙年齢: 137億歳 ± 1% $H_0 = 71 \text{ km/s/Mpc} +4 \sim -3$

が、提示されてきている。

WMAP : Wilkinson Microwave Anisotropy Probe; ウィルキンソン・マイクロ波異方性探査
CMBR : cosmic microwave background radiation; 宇宙マイクロ波背景放射

これは、ハッブル・キー・プロジェクトのチームにより決定された値を認めている。それは種々の銀河内のセファイド観測のために打ち上げたハッブル宇宙望遠鏡: HST を用いて H_0 の値を較正することに加えて他の測定技術も併せたプロジェクトである。彼らは次のような値を得た。

$H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc} \pm 10\%$

"The Expanding Universe & Hubble's law" <<http://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/cosmicengine/hubble.html>>

赤方偏移 “Z”

赤方偏移と距離を結びつける公式は次のように Z で定義されている。

$$Z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0 = \delta \lambda / \lambda_0 \quad \text{または}$$

$$1 + Z = \lambda / \lambda_0$$

λ : 天体の測定波長、 λ_0 : 元の波長、 $\delta \lambda$: 波長差

この Z による距離の計算は次の積分方程式によるが、素人には難解を超える。だから、理論物理学を目指す高校生には、数学をハンパにしないで徹底して学んでほしい。そうすれば大学で微分方程式の壁を苦勞なく乗り越えて、ゆうゆうと研究に没頭できる。

$$x = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz}{\sqrt{(1+z)^3 \Omega_0 + \Omega_\Lambda}} \quad t = \frac{1}{H_0} \int_0^z \frac{dz}{(1+z) \sqrt{(1+z)^3 \Omega_0 + \Omega_\Lambda}}$$

宇宙膨張に関する宇宙論の式。銀河の赤方偏移を z、現在の距離を x、z に対応する時刻を t とする。

宇宙論パラメータの現在の観測値

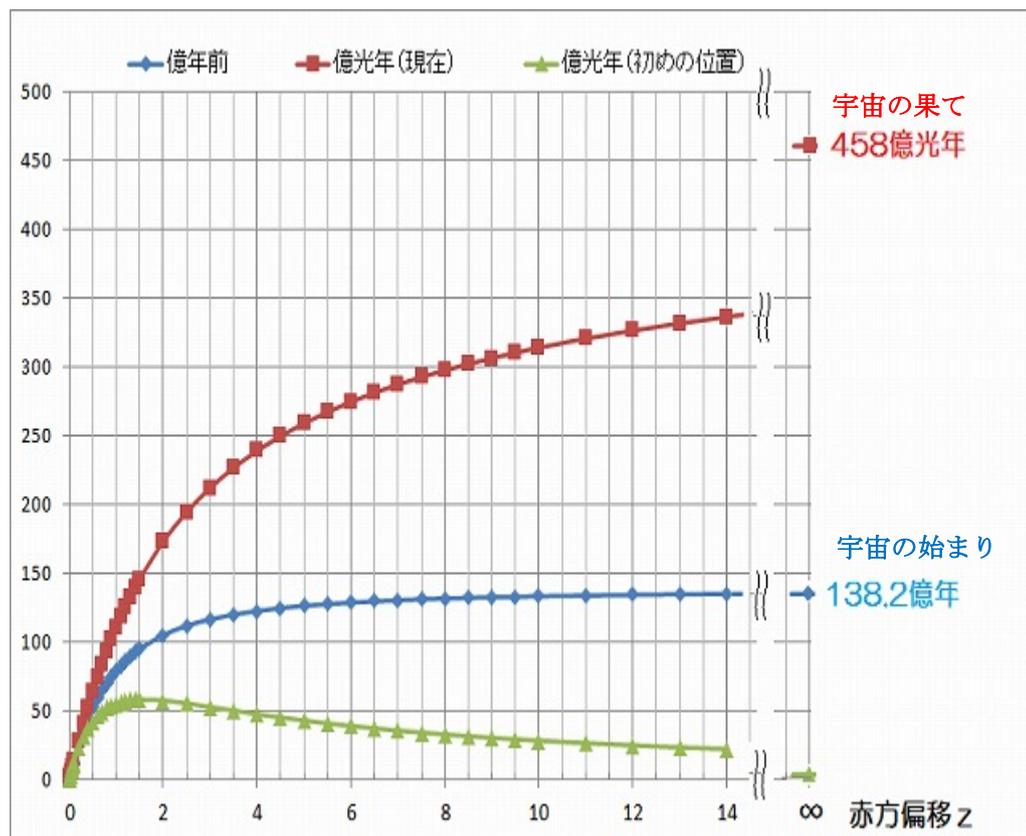
(1) ハッブル定数 $H_0 = 67.15 \text{ km/s/Mpc}$

(2) 密度パラメータ $\Omega_0 = 0.317$

(3) 宇宙項 $\Omega_\Lambda = 0.683$

(4) 光速 $c = 2.99 \times 10^5 \text{ km/s}$

その計算結果によるデータを基にグラフ化したものが次図である。銀河までの距離を見るには、真ん中の青い線が該当する。一番上の赤い線は右端では宇宙の果てを意味する。



<http://www.sci-museum.kita.osaka.jp/~ishizaka/redshift.html>

なお、 $Z \leq 2.0$ の場合についての数値は次表のとおり、ということである。赤い蘭が私たちの感覚での距離データである。

Redshift-Distance Relation : 赤方偏移と距離の関係

宇宙の年齢: 138.26 億年

宇宙論パラメーター: ハッブル定数:67.15

物質 (ダークマターを含む) :0.317

ダークエネルギー: 0.683

輻射:0

曲率:0

赤方 偏移 Z	スケールファ クター	ドップラーシフトによるみか けの後退速度(km/s)	光が届くまでにかか った時間 (億年) = 一般的な「天体ま での距離」(億光年)	光がたどってき た経路の長さ = 実際の距離 (億光年)	実際の後退速度 (km/s)	天体の見かけ のサイズ(秒角) (観測対象:直径 10 万光年)
0	1	0	0	0	0	-
0.1	0.90909	28487.07	13.55	14.21	29264.16	16.75
0.2	0.83333	54060.94	25.29	27.7	57046.19	9.79
0.3	0.76923	76898.44	35.51	40.46	83327.27	7.55
0.4	0.71429	97229.99	44.43	52.5	108123.13	6.5
0.5	0.66667	115304.79	52.26	63.84	131476.19	5.92
0.6	0.625	131369.73	59.15	74.51	153447.71	5.58
0.7	0.58824	145657.52	65.23	84.54	174110.92	5.38
0.8	0.55556	158380.92	70.63	93.98	193545.38	5.26
0.9	0.52632	169730.65	75.43	102.86	211832.85	5.2
1	0.5	179875.47	79.72	111.22	229054.24	5.17
1.1	0.47619	188963.45	83.57	119.1	245287.65	5.18
1.2	0.45455	197123.81	87.03	126.54	260607.14	5.21
1.3	0.43478	204468.94	90.15	133.57	275082.04	5.26
1.4	0.41667	211096.46	92.98	140.22	288776.69	5.32
1.5	0.4	217091.09	95.55	146.52	301750.41	5.4
1.6	0.38462	222526.36	97.9	152.49	314057.66	5.48
1.7	0.37037	227466.17	100.04	158.17	325748.29	5.57
1.8	0.35714	231966.11	102	163.57	336867.82	5.66
1.9	0.34483	236074.61	103.81	168.71	347457.81	5.76
2	0.33333	239833.97	105.47	173.61	357556.18	5.87

<http://www.lizard-tail.com/isana/lab/redshift/redshift-distance.php>

アンドロメダ銀河のスペクトル青方偏移

20 億年後に天の川銀河と衝突あるいは交差する。これはハッブルが発見した特異な青方偏移現象であるが、当時は秒速 200km 程度であると見積もられた。

NASA が 2014 年に発表したデータによれば、秒速 110km でアンドロメダ銀河が接近しているようだ。これにより計算すると、40 億年後に二つの銀河は衝突することになる。衝突ときけば、私たちには破局的感覚が強い。天の川には 2 千億ぐらいの恒星があり、アンドロメダは大きさが 2 倍近くあるので約 4 千億の恒星が集まっていると見積もられている。しかしながら実際は、恒星どうしのスマッシュが起きる確率は極めて少ないという。ゆえに「衝突」ではなく交差して合体するというシナリオが有力であり、最後は楕円銀河になるらしい。

この広い宇宙においては、列挙に暇がかからないほど多くの銀河衝突の事例が掲げられてきている。次の画像は、その典型的な実例である。

渦巻銀河の衝突 The Colliding Spiral Galaxies of Arp 271 2008 July 21



[説明]これらの銀河はどうなるのか？ 渦巻星雲 NGC5426 と NGC5427 は、お互いに危うき接近をしている。しかし、それぞれはこの衝突をうまく生き抜くだろう。多くの頻繁な銀河衝突時は、大きな銀河が小さいものを食べてしまう。だが、このケースでは、二つの銀河はけっこう似ている。それぞれは広がった腕とコンパクトな核をもった広大な銀河である。銀河が次の数千万年を超えて前進するように、それらの成分たる星々は衝突することはない。しかしながら、新しい星々が重力の押し寄せで起こされるガスの集積の中で産まれるだろう。チリの 8m 南ジェミニ望遠鏡によるこの画像をよく見れば、物質が時々刻々と二つの巨大銀河をつなげていくブリッジが示されている。ひとまとめにした Arp271 として知られており、相互交差するペアの広さは 13 万光年ほどで、おとめ座銀河団の方向に 9 千万光年先にある。かなり可能性があるものとして、我々の天の川銀河は、隣のアンドロメダ銀河と 50 億年後に同様な衝突を経験するだろう。

<https://apod.nasa.gov/apod/ap000511.html>

NGC 3314: When Galaxies Overlap 銀河の重なり合い



[説明] NGC 3314 は、実際に二つの大きな渦巻銀河の合体しているものである。前面の渦巻は、その形が風車のように正面から見える。後ろの銀河は、星間ダストの暗い筋が渦巻であることが明らかである。そのダストのスジは驚くほど蔓延しており、めまぐるしく交差している銀河ペアは数少ないうちの一つである。すなわち、銀河内の恒星を超える光の吸収が、ダストの分布を直接観測することに用いられる。NGC 3314 は後ろ側が 1 億 4 千万光年先にあり、前面の銀河が 1 億 2 千万光年の距離にある。複数の頭を持つ「うみへび座」の方向にみえる。後ろの銀河の広がりには 7 万光年と見積もれる。

https://apod.nasa.gov/apod/image/1107/NGC3314_HLApugh.jpg

このショッキングな現場は私たちの好奇心と恐怖心をくすぐる。果ては、もっと凄いものが見たいと思うのが人間である。そのためにもすさまじい実例を次に掲げる。まるで的を貫通したライフル弾のように見えるが、銀河は巨大だからそれらの動きは何千万年以上もかかって物凄く遅い。

Arp 148



NASA, ESA, the Hubble Heritage - ESA/Hubble Collaboration, and A. Evans

Arp148 は、二つの銀河が遭遇した後のよけた余波である。結果としてリング状の銀河と長い尾を引いた相手が見える。これらの親の銀河の衝突は、最初の突っ込みで衝撃波を生み出し、リングの外側に伝搬している。リングに直角にのびた細長い連れ合い銀河は、Arp148 がまさに進行中の衝突のスナップであることを呈している。赤外線観測により、明るい核を横切る暗いスジのように、強くあいまいな領域が見いだされる。Arp148 は“メイオール天体”というあだ名がついた。それはおおぐま座の方向にあり、約 5 億光年先にある。奇妙な銀河に関する Arp のカタログの 148 番目に登録されている。この画像は、2008 年 4 月の 18 回記念として HST で撮った 59 の交差銀河事例のうちの一つである。この Arp148 はおおぐま座の方向にある。

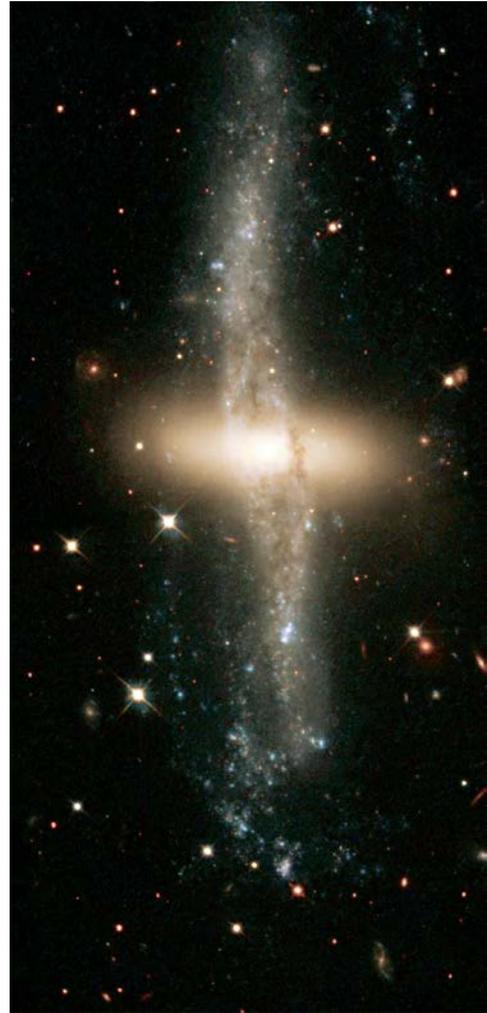
アープ・アトラス(Atlas of Peculiar Galaxies)は、ホルトン・アープが編纂した特異銀河の**天体カタログ**である。合計 338 個の Arp 銀河が収録されており、1966 年にカリフォルニア工科大学から第 1 版が発行された。

<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2008/16/image/aa/> (direct link)

Ring Around NGC 4650A

連想は妄想に発展しやすいが、この広い宇宙はそれを受け容れてくれる。弾丸銀河が的銀河に当たった瞬間もあるはずである。確かにあったが、その発見こそ恐怖でもある。

右図は、1億3千万光年先にあるリング銀河 NGC4650A である。その説明によれば、おそらく10億年ほど前に起きた壮大な銀河どうしの正面衝突であろうと言われている。



<https://cdn.spacetelescope.org/archives/images/screen/opo9916a.jpg>

次頁に掲げる画像は、突き抜けた後の状態を正面から見たようなものである。周りの輪はリング銀河と呼ばれており、中心の明るい塊は突き抜けてリングの向こうに行ってしまった銀河のようである。

これらの凄まじい衝突は奇しくも、側面画像、正面画像ともにいま彼方の宇宙に見える別々の衝突現場でもある。

Ring Galaxy AM 0644-741 from Hubble



<https://apod.nasa.gov/apod/archivepix.html>

説明： リング銀河はどのように形作られるのか？ 右側に映っている青い銀河の輪は、極端に輝き多量の恒星で構成される直径 15 万光年の分厚いものになっている。その銀河：AM0644-741、リング銀河として知られ、巨大な銀河衝突により生じた。銀河衝突時、個々の恒星が接触することが稀なとき、それらがお互いを通り抜ける。輪のような形は、大銀河を突き抜ける小さな侵入銀河により重力崩壊の結果である。これが起きるときは、星間ガスやチリが濃縮される。池の表面の波紋のように突入点からわき

あがる星々の波により起きるものである。侵入銀河は、ハッブル宇宙望遠鏡により撮られたリング・フレームの外側にある。なお、この AM 0644-741 は 3 億光年先にある。

(5) ハッブルの過誤とその行方

ハッブルはセフィイドに二つの種族があることを見過ごしていた。つまり、種族 I と種族 II であって彼は距離計算に種族 II を適用してしまった。

種族 I は、大変明るく若い星の古典的セフィイドである。

種族 II は、古い星のセフィイド族であり、種族 I より暗いが膨張・収縮の脈動や周期その他が一般的な恒星にそっくりである。

セフィイド観測の初期には、これら二つの種族の分別が余り留意されなかった。そのようなこともあったのであろう。1923年、ハッブルは種族 II により計算してアンドロメダ銀河までの距離を **90万光年** と見積もった。発見した変光星：ハッブル V 1 (Variable 1) は、実はクラシカルな種族 I だったのである。絶対光度は4倍も明るい。

その後しばらくして、ウォルター・バーデ (1893-1960 年) によりそれらの綿密な観測が行われた結果、ハッブルの見積りが修正されて **230万光年** となった。1940年代にウィルソン山天文台にて、アンドロメダ銀河における変光星が再調査され、ハッブル V 1 が種族 I であることが判明した。昨今では、その後に発見された変更周期が極端に短い“RR-Lyrae (ライエ)” という変光星も含めてアンドロメダにおける変光星3種の観測により、250万~300万光年の間でいくつかの距離が計測されたが、一応、一般的には230万光年という数値が定着している。

しかしながら、ハッブル V 1 は何故か不動の栄光に輝き続けている。発見というものは、それほど称賛されるべきものということを改めて私たちに訴えている。コロンブス (1451-1506 年) も実際はアメリカ大陸ではなく、今の西インド諸島に上陸したのである。大陸自体はその後にアメリゴ・ベスプッチ (1454-1512 年) により発見され、その名が大陸に冠されて「アメリカ」となった。それでも、最初の発見者がコロンブスであることを歴史は刻んでしまっている。

ハッブルの場合は、その他に、やはり「膨張宇宙」の端緒になった

「銀河は後退している」

という発見の方がはるかに巨大な偉業であり、やがての「ビッグバン」として天文学を超えて宇宙物理学の永遠の課題になったことは、誰しも忘れることはできない。1930年にウィルソン山天文台を訪問したアインシュタインをして、ハッブルの銀河の後退という観測に接しながら「私は人生で最大の過ちをおかしてしまった。」と言わしめた。すなわち、彼は自らの宇宙方程式に重力に対向する**斥力のラムダ項**を追加してバランスのとれた「平衡宇宙」を唱えていたのに、すみやかにそれを外してしまった。しかしそれ以前に彼の頭にはある悩みがあった。それはラムダ項が付いていない原典宇宙方程式から1922年にロシアのアレクサンドル・フリードマン (1888-1925 年) ほかにより膨張宇宙解が導かれて、彼が信じる平衡宇宙がほころび始めていた。この背景も見逃しがたい。でも、三転してこの捨てられたラムダ項が甦る日が来ようとは誰が予測できたであろうか。このワクワクする物語は次回に委ねたい。

これまでに定式化された変光周期・絶対光度関係について以下に述べる。

先ず、変光周期 (t) を測定し、次式により絶対等級 (M) が求められる。

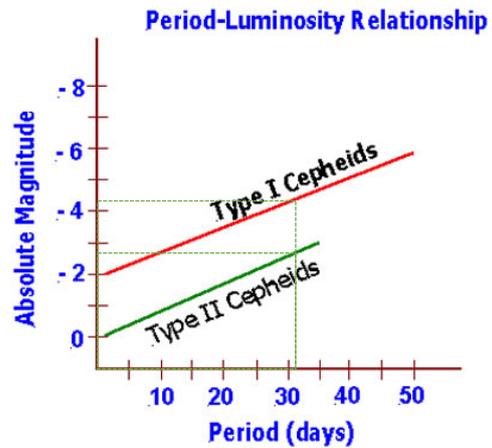
$$M = -1.4 - 3.0 \log t \quad \text{種族 I}$$

$$M = 0.1 - 3.0 \log t \quad \text{種族 II}$$

これらから、観測による実視等級 (m) を測定し、次式から、距離 (D : パーセク) が求められることができる。

$$\log D = 0.2(m - M) + 1$$

[再 掲]



ハッブルV 1の周期：tは“31.4日”で、実視等級：mはV 1の平均等級である“18.6”を基にすると、次のように極めて単純な計算ができる。

種族 I	種族 II
t=31.4、 m=18.6、 M:絶対等級、 D:距離	
M ≒ -4.3 (グラフより)	M ≒ -2.7 (グラフより)
D = 10 ^{0.2(m-M)+1} = 10 ^{5.8} = 630,957pc	D = 10 ^{0.2(m-M)+1} = 10 ^{5.26} = 181,970pc
D = 2,056,920 (約200万光年)	D = 593,222 (約60万光年)
実はハッブルV1はこちら。	ハッブルの計測値であろうと想定。

ハッブルの計算とは異なる。絶対等級Mをハッブルが参照したとものと思われる観測結果のグラフとは違うが、米国の大学で教育用に使われているイラストみたいなグラフから読み取ったものである。多少のズレは仕方ない。

ダークマター

不思議な言葉である。この広い宇宙の探査が進まない限り現れ得ないものであろう。幽霊は人間の心理動作が生み出したものであるが、これは観測されなければ絶対に生まれない言語である。観測できないから生まれたともいえる。それで“ダークマター”と名付けられ、日本語では「暗黒物質」と訳されたが、見えないものは透明であるはず。暗黒は周りに明るさがあれば暗くみえるのにそう呼んだことは宇宙が全体的に暗いからであろうか。

ベラ・ルービン（1928 - 2016年）という女性天文学者がいた。彼女は何故か「銀河」に興味を深めて、1970年頃、一つの銀河自体の動きよりもその中の恒星の運動に着目した。ハッブルの後に銀河に何が残っているのか。とんでもないことを見つけたのだから、彼女の功績はハッブルに次ぐものともいえる。しかも、天体の発見ではなく「何もないこと」を発見したのである。見えない物では、例えば透明人間というフィクション漫画があった。そんなものを見つけたのだ。

「ダークマター」の存在を最初に予測したのは、スイスの天文学者であるフリッツ・ツビッキー（Fritz Zwicky (1898年-1974年)）で1933年のことであった。彼はかみのけ座銀河団の観測において、銀河の動きが予測よりも速いことに気付き、各銀河の推定質量による重力が働くとしても計算上あり得ないもので、恒星以外に見えない何かがあると考えた。それを「ダークマター」と名付けたが具体的かつ精細な観測データが示されなかったので、棚上げされてしまったのである。



<http://www.phys-astro.sonoma.edu/brucecedalists/rubin/rubin.jpg>



2008 June 16 かみのけ座銀河団

かみのけ座銀河団の中央部

説明: 左図の中で映っているものはほとんど銀河である。かみのけ座銀河団は、数千の銀河を含んだ、もっとも密集した銀河団の一つである。我々の天の川同様、それぞれの銀河が数十億の恒星から成る。他の銀河団に比較すると近いが、かみのけ座銀河団から光が届くのに数億年かかる。実際、端から端まで数百万光年かかるほど大きい。モザイク画像の部分的な左図は、いかに密集銀河団が形成され進化したかを調査するために、前例がないが、HSTで撮られたものであった。銀河団の中のほとんどの銀河は楕円であるが、いくつかは明らかに渦巻状である。画像の左上の渦巻銀河は青い銀河として見られる。背景には、関係ない数千の銀河が宇宙に拡がっているのがみえる。

ベラ・ルービンの観測は正確なデータで裏付けられたから、世界中の宇宙物理学者を瞠目させ、一斉に彼らを観測研究に動かしたのである。究極の宇宙物理の理論家さえも即座に研究に着手して、宇宙の構成物質の一つとして分別してきたことには、あきれる。見えないのに。素

粒子物理学者も驚愕して、あの反物質である「陽電子」さえディラックに予言されて現実に観測されたように、これまで絶対に信じられてきた量子論もダークマターには無視された感じがしないでもない。ニュートリノのようにすべてのものを貫通してしまう。そんな物質なのだから彼らもいまだに地団駄ふんでいるとうかがえてしまうのも仕方がない。

革命とか革新などを超越した発見でもあるから、21世紀を全部使っても解明できるかどうか怪しい。そんな発見の経緯と研究前線に飛び込んでみよう。

<https://astrobites.org/2016/12/27/how-one-person-discovered-the-majority-of-the-universe-the-work-of-vera-rubin/>

The work of Vera Rubin by Zephyr Penoyre | Dec 27, 2016 |

「名声ははかない、私のスタッフたちこそ私の名前以上に貴重なのである。天文学者がこれから何年も私のデータを使い続けるなら、それこそ私への最高の賛辞となる。」

ベラ・ルービンの言であり、人となりを知ることになった。彼女がダークマターの存在を発見したというたった一つの重要な証左を私たちに提示したことについて私は議論したいのである。彼女は多くの人々に対して一つの啓示であり、そして88歳で先週の日曜日に逝去したと告げることが悲しいのである。

これからしばらくこのサイトが読まれるように彼女に捧げるだけでなく、ここで私は、彼女が彼女の業績について言いたかったことを採り上げようとしている。それがいかに、我々が信じる以上にはるかにたくさんの宇宙について活用されたか、である。

ここでは、彼女の二つの論文の要旨について述べる。最初が神秘への手掛かりを含み、その次が決定的な証明への糸筋、すなわち見えなくて未発見の何かが夜空に見えるそれぞれの銀河を包み込んでいることである。



ベラ・ルービン：地球儀に囲まれながら、写真を撮ってくれと言わんばかりに。

論題： 放射領域のスペクトル分析調査におけるアンドロメダ星雲の回転について

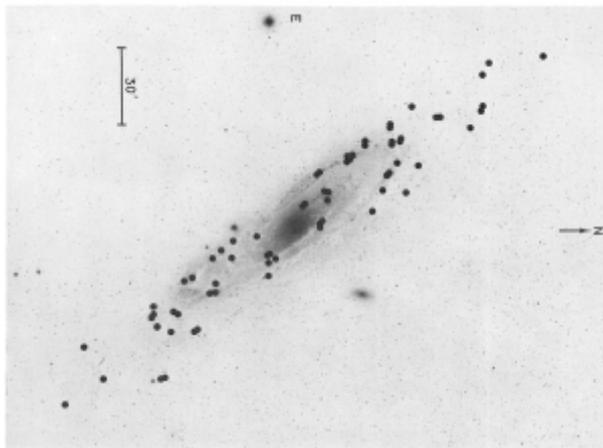
著者： ベラ・ルービン、W ケント・フォード Jr

所属： カーネギー学院及びキットピーク天文台；ベラ・ルービン

期日： 1970年

全ての物質は重力で相互作用する。
 全ての物質は電磁力で相互作用する。
 この論文が出た年の世界観である。(他に二つの根本的な力(原子核力)があるが、無視しよう。)

今日までこれら二つの原理は信じられてきているが、ベラ・ルービンは基本的に他の一つを落している。彼女は、古典物理学の単純な研究を適用してきた。彼女は銀河(特にアンドロメダ銀河)の中の恒星がその中心の周りに如何に速く動くかについて疑問を呈したのである。



アンドロメダ銀河—ドップラー—偏移放射により周回速度が見つかった67のH II 領域(黒点)

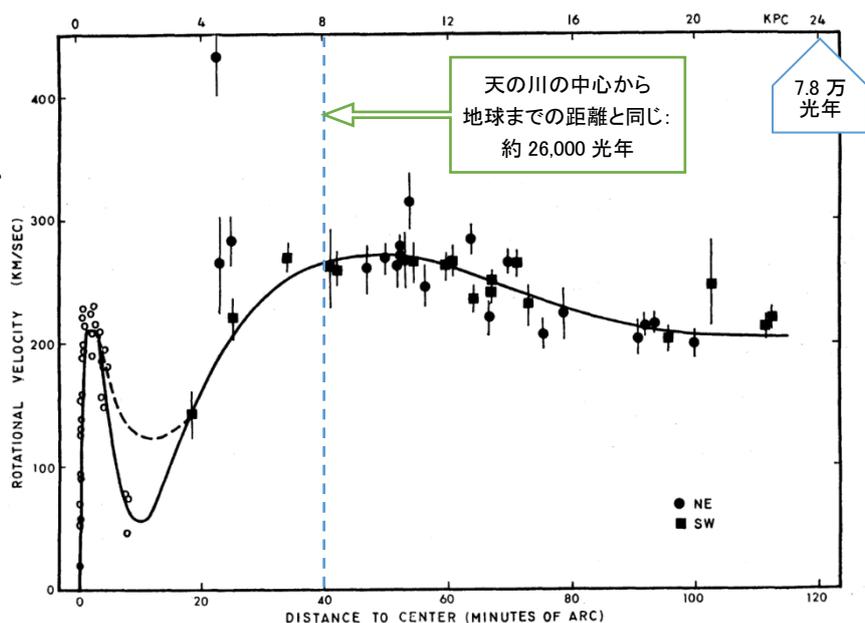
[HII 領域:HII region とは、電離された水素が光を放っている天体である。直径数百光年に達する大きさをもち、内部で星形成が行われている。このガス雲の中で生まれた若い高温の青い星が多量の紫外線を放出し、星の周囲にある星雲を電離することで光っている。]

一つの銀河においては、その中心の周りをガスやその他のものがだいたい円形の軌道を動いている。重力が絶えず内側に働いているが、確かなある速度で動いている。だから、それらの通路は軌道の中に傾いている。周回軌道はほとんど自然に、最小の周回エネルギーで、それら自身の塊りに残された全ての対象物はその中に落ち着こうとしている。しかし、周回軌道にあるためには、確かな重力で引かれる必要がある。外側に行かないよう余り強くなく、けれどもそんなに弱くなく引っ張られるように。

これは、どのぐらい速く周回しているかを知れば、どのぐらい重力が強いかわかることを意味する。

右図:
 中心からの距離に対応したアンドロメダにおけるH II 領域の周回速度

横軸の目盛は40分角で天の川の中心から地球までの距離と同じ。

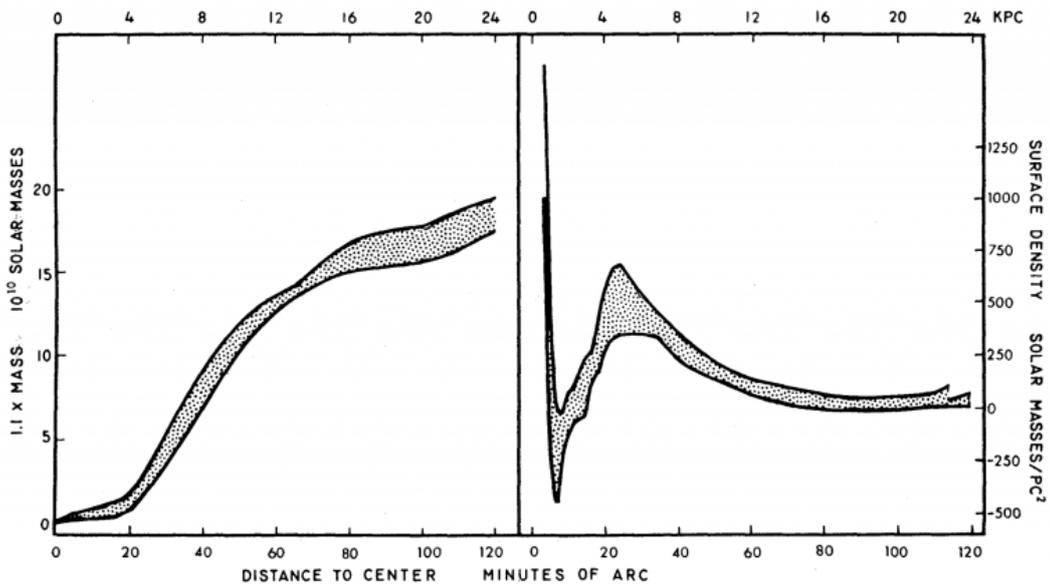


黒い点は、測定したH II領域であり、黒い曲線はそれらに試みに適応させたものである。しかし、重力の強さを計算して出来るだけではない。二つの物体の間の距離と質量に応じたニュートンの一般運動方程式がある。

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

二つの物体間の引力Fは、それらの質量とそれらの間の距離：rに拠る。Gは定数で宇宙のどこにでも通用する数字である。

銀河内をその質量だけの重力で周回する一つの恒星にとって、軌道に含まれる質量もある。(周回円の外側に働く力(遠心力)できれいにキャンセルされる。)それは、半径と周回速度によるものと、実際に見える縺われたものによるもの、そしてそこにどのくらいの質量があるかは遙かな銀河の中心にあるものを見つけ出して、それらの力を比較することができることを意味している。



左は、アンドロメダ中心から一定の半径内に含まれる質量を示す。右は、ある半径における対応密度である。左図では、大きな半径(20kpc以上)でも質量は増大している。

いま、銀河を見つめたら星々が見える。それらはそこにあるからでなく、光を発しているからなのである。光を吸収したり再放射しているガスやチリの影響も見えるかもしれない。そのように光の量から相当な物質と銀河の質量を推定できるであろう。銀河は、だいたい大きさが10kpc(3.26万光年)ぐらいの質量の小さな塊に座っていると結論できるだろう。そこから遠くに行くほど質量は一定になり、半径は大きくなり、周回速度は落ちるはずである(結構早く)。

しかしながらベラ・ルービンとケント・フォードは、非常にかすかに何か違うものを見た。周回速度はそれほど急に落ちない。銀河の外側の縁に、けっこう大量の質量の何かがある。見えないけど何か、銀河の質量を計算するときに算入できない何かがある。

ここに一つのヒントつまり手掛かりがあった。それは何かが浮かんでいる。特定できるものは何もないが。この失われている質量に対する数多の説明があった。データにおけるエラーから、銀河の縁にある異常な古い残留ガスまで。

10年ほど過ぎると、ベラ・ルービンの業績が一握りの興味を引いて、失われた何かの決定的証拠にひるがえった。大きな何かである。

論題： 広範囲の光度と半径を持つ SC21 銀河の周回特性

著者： ベラ・C・ルービン、W ケント・フォード Jr、ノーバート・トナード

所属： カーネギー学院ワシントン (ベラ・ルービン)

期日： 1980年

インタビューの間、彼女はこの研究を止めなかった。しかし、科学はのろい野獣になりうる（実際、10年は相対的に速い）。そして、彼女の発見を固めて科学的革命を動かしたのはこの論文である。

彼女は何をなしたのか？ そう、これまでどおり同じことだが、より改良した。銀河の縁の小さな特別な周回が無視されている。絨毯の下の掃除になる。たった一つの銀河の縁における特異性である。すべての異なるサイズとタイプの中で全体のホスト銀河についての明白なデータから、何が明らかになったのか？

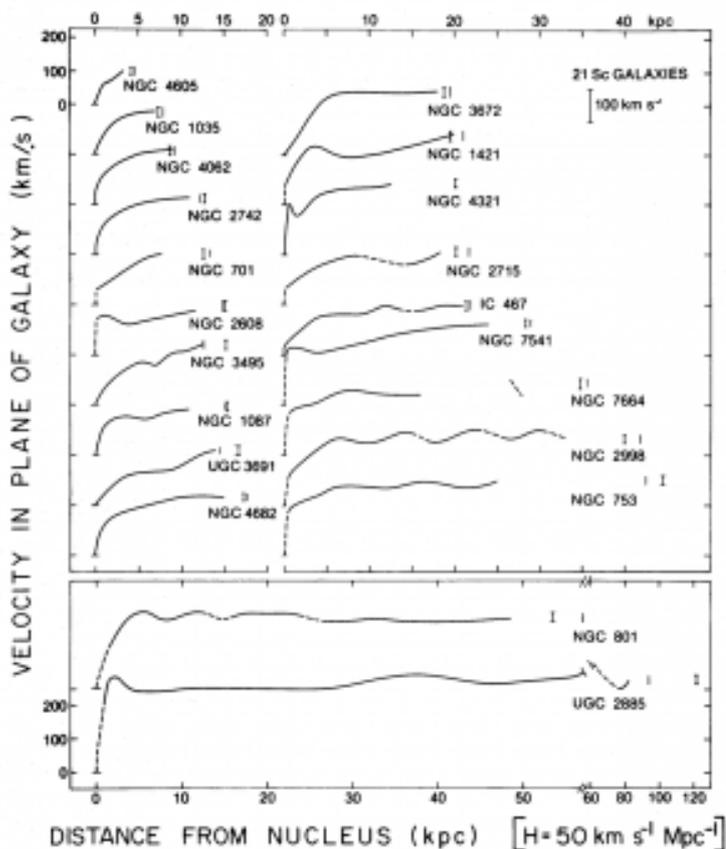
星やガスが薄くなり始めるあたりを越えて。見えるかどうか何かの物質が推論できるあたりを越えて。それでも何かがそこになければならない。

著者のことばを引用すると、

「光る銀河を越えて光らない何かがあるという結論は避けられない。」

ベラとその他によるさらなる研究は、刷新され再成型されてこの説を前進させるだろう。たまたま、宇宙は、恒星、ガスや私たちが形成する通常物質の5~10倍以上、この物質で満た

これは何か：



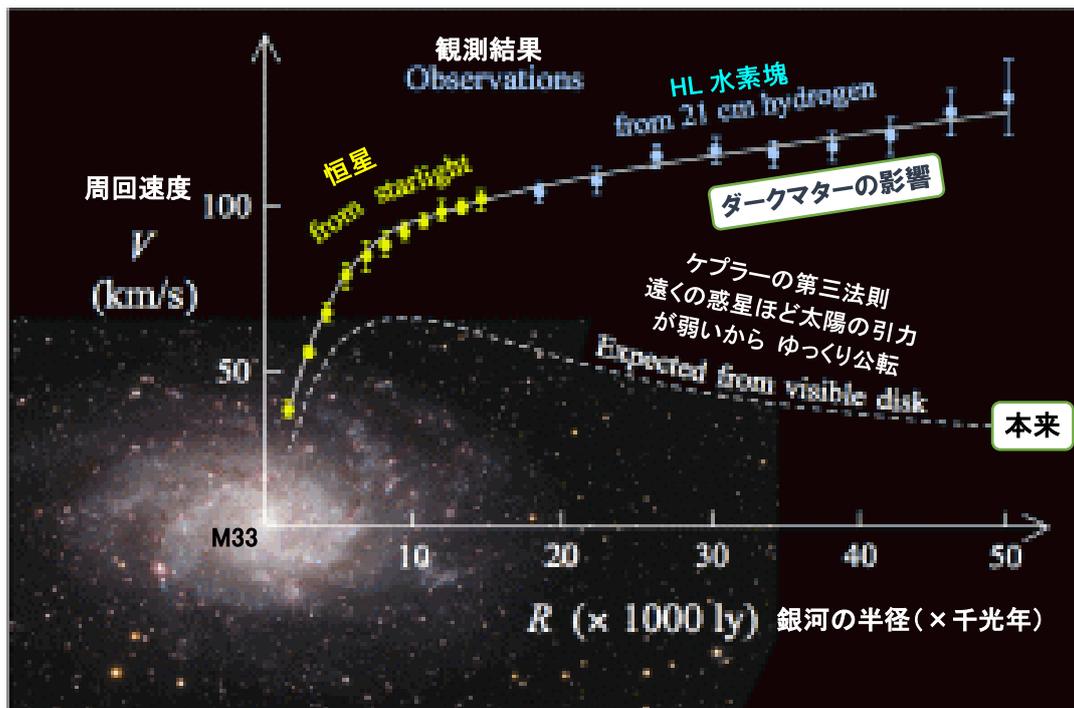
21の銀河の周回速度曲線、すべて異なる種類とサイズで紛れもない同じ尾のすべてのうち。

されていなければならないことが明らかになった。

そして、この物質は他の物質のようではない。そのため、他のあらゆる検知方法を逃れることが無明（光を出さない）であらねばならない。それは光やその他のすべてと相互作用もできないのだ。それに光が吸収され、反射されるかまたはそらされるかとなるなら、その効果を見られるだろう。これまで発見された他のあらゆる物質とはちがって、それは電磁気力との相互作用も反応もしない。

皮肉なことに、宇宙において影すらないたった一つのものとして、それは**ダークマター**と呼ばれた。

しかして、それが新種の素粒子なのか重力方程式における振（よじ）れの代用物なのか、それが何であるか依然として正確に分からない。しかしながら、それは宇宙の最重要で最も影響力のある成分の一つであることは明らかである。その発見者として正に、ベラ・ルービンは、最重要で最も影響力のある功績を残した天文学者の一人であった。



M33 銀河における今日の周回曲線。そこでは恒星が内側に締まってガスが外に広がる速度が見られる。点線の曲線は実際に観測される質量によるカーブであり、ダークマターの余分な質量で生起する前者のカーブとの違いが見てとれる。まさに驚異的だ。

<https://astrobites.org/2016/12/27/how-one-person-discovered-the-majority-of-the-universe-the-work-of-vera-rubin/>

M33: Triangulum Galaxy ; APOD



半径 5 万光年で 3 百万光年先にあり、私たちの局所銀河群に属しアンドロメダの後方に位置する。

ダークマターの正体

いまだに正体不明の透明のような物質である。

一応、ベラ・ルービンの観測などにより次の四つの特徴が挙げられている。

- | | |
|--------------------|------------------------|
| (1) 見えない | (光(電磁波)を出さない、反射しない) |
| (2) 電荷を持たない | (電気力や磁力に反応しない) |
| (3) 重さだけがある | (宇宙の全銀河：約 5 千億に溜まっている) |
| (4) 安定である | (陽子みたいに永遠に壊れそうもない) |

とにかく、重力が働くための重さだけがあって光らないのだから、観測は困難を極めている。理論物理学者は想像を超えて己の理想に酔うがごとく棚に上げた超対称性粒子など持ち出して、怪しさにめげず疾（やま）しさに不感症で勝手放題に予言しているが、悲しいかな核心には迫っていない。

問題は、既存の素粒子論や一般的に解説できない超弦理論（スーパー・ストリング）などの体系化に縛られているからではないだろうか。だいたい、重力を原子核力の強い力と弱い力に統一する理論など苦し紛れの悶えは止めたほうがよいのかもしれない。

素人発想的には、ダークマターはどうもダーク理論のような原理に律せられているのではない。すべてを御破算にして**人間原理**を超える領域での洞察が必要である。つまり、アインシュタインが突破したような人間感覚の外にあるものを開拓すべきなのではないか。例えば、ブラックホール内の物質の潰滅状態を、あいもかわらず特異点として片づけないで、解いて欲しいと思うのは私だけではないだろう。

そうは言ってもこれまでの研究をほっとけない。実情は知るべきである。

以下に、ダークマターの正体に関する四つの候補について掲げる。

<http://osksn2.hep.sci.osaka-u.ac.jp/~naga/kogi/konan-class06/ch8-darkmatter.pdf>

MACHO (MAssive Compact Halo Objects): マッチョ

光らない星には褐色矮星、中性子星、ブラックホールなどがある。これらを総称して MACHO と呼ぶ。銀河内ハローにあり、地球近傍の MACHO が星への視線を横切ると、星の光が MACHO の重力レンズ効果によって増光する。MACHO 実験では、大マゼラン星雲の 8.5 億個の星の光の時間曲線を観測し、8 個の候補を見つけた。この数は、観測装置の雑音レベルを越えてはいるが、数が少ない。小マゼラン星雲観測を含む EROS グループ観測結果をも総合すると、MACHO は銀河の暗黒物質の主成分にはなり得ない。

WIMPS (Weakly Interacting Massive Particles) : ウィンプス

現在暗黒物質の最有力候補と目されているのは、素粒子論で予言される超対称性 (SUSY : スッシー) に伴う粒子である。超対称性は、既知の粒子と同じ相互作用をするが、スピンの $1/2$ 異なりかつ質量の大きい (典型的に数百 GeV) SUSY 粒子が全ての既知の粒子のパートナーとして存在することを予言する。R パリティ (SUSY 粒子が持つ固有の量子数) が保存すれば、最も軽い SUSY 粒子は安定である。SUSY 粒子と通常粒子との相互作用は、結合力の強さは通常粒子と同じであるが、質量の大きい中間状態を通すので実質的に弱くなり、おおむね「弱い力」程度の強さであり、WIMPS と総称する。

電氣的に中性の**ニュートラリーノ** (χ と書くことにする) は暗黒物質としての望ましい性質を全て備えている。ニュートラリーノとは、フォトン、Z ボソン、中性ヒッグス粒子の超対称性パートナーの混合状態でスピン $1/2$ を持つマヨラナ粒子である。いまだに観測にかかっていない。

ニュートリノ : もしニュートリノ質量が $\geq 20\text{eV}$ の範囲にあるならば、暗黒物質の主要成分になり得るが、電子 (約 0.5MeV) の百万分の一以下だから、せいぜい 0.5eV にしかならない。また、ニュートリノは熱い物質であり、銀河構造形成のシミュレーションとは一致が良くないことは以前から指摘されていた。スーパー・カミオカンデ実験などによるニュートリノ振動の発見により、ニュートリノ質量は小さく暗黒物質の主要成分にはなり得ないことが分かり、候補から除外された。

アクシオン： アクシオンは非常に軽いが、熱的でないいわゆる傾斜 (misaligned) アクシオンは、極低温でボーズ・アインシュタイン縮退状態にあるので冷たい暗黒物質に分類される。アクシオンの存在は強い相互作用が CP (電荷とパリティ) を保存することの解決策として提案されたが、数々の実験や観測で存在可能範囲が非常にせばまっており、現在開いている窓は、ほぼ質量が $10^{-6} \sim 10^{-3} \text{eV}$ 程度に限られる。アクシオンは 2 個のフォトン (光子) に崩壊できるので、強い電磁場に通せば、アクシオン質量に等しいエネルギーを持つフォトンが放出される。マイクロ波技術を使った実験が進行中である。

<http://osksn2.hep.sci.osaka-u.ac.jp/~naga/kogi/konan-class06/ch8-darkmatter.pdf>

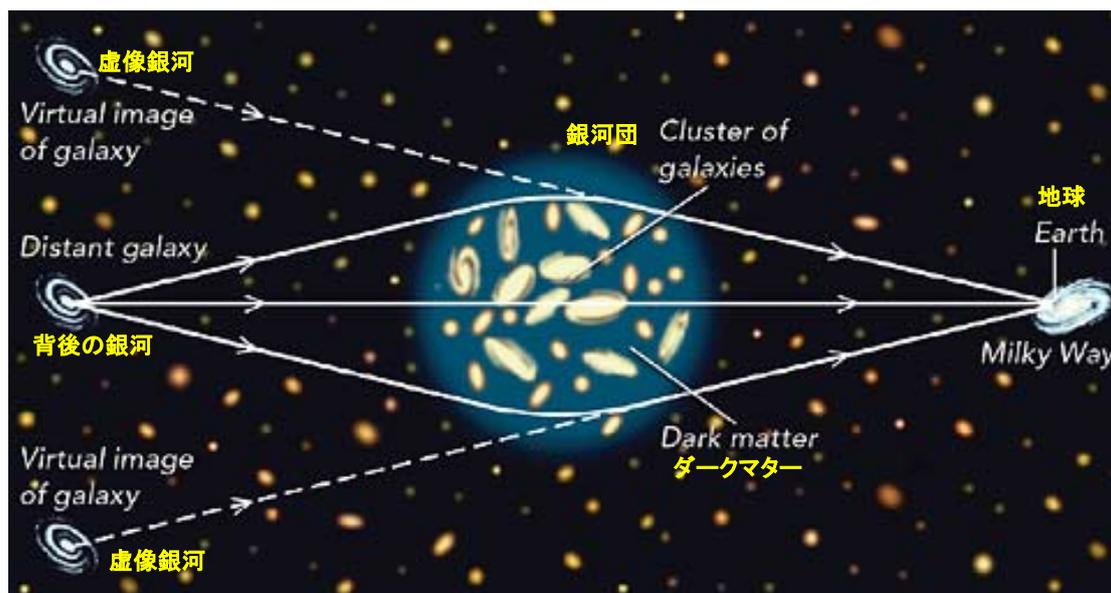
いずれも、広大な樹海における行方不明者の捜索のように見つからない。太っちょかやせ型か、ノッポかチビか、どんな色の服を着ているか、人なつっこいか、などなど。世界中の宇宙物理学者が頭を抱えても、何百億円も投資して観測施設を造っても発見できない。どうしようもない冥界に彷徨っている。誰が助けてくれるというのか。

重力レンズ

見えないものが観測できるのか？ 科学者たちは知恵を絞った。

その結果、「重さがある」という 1 点に絞られ、アインシュタインの一般相対論が予言している「重力レンズ効果」がにわかに着目された。これは、重力が強ければ光も曲がるという現象の拡大解釈であり、巨大な質量が集まる銀河団は後方の銀河の光を曲げて凸レンズのように働くのではないかという推論である。

重力レンズ効果



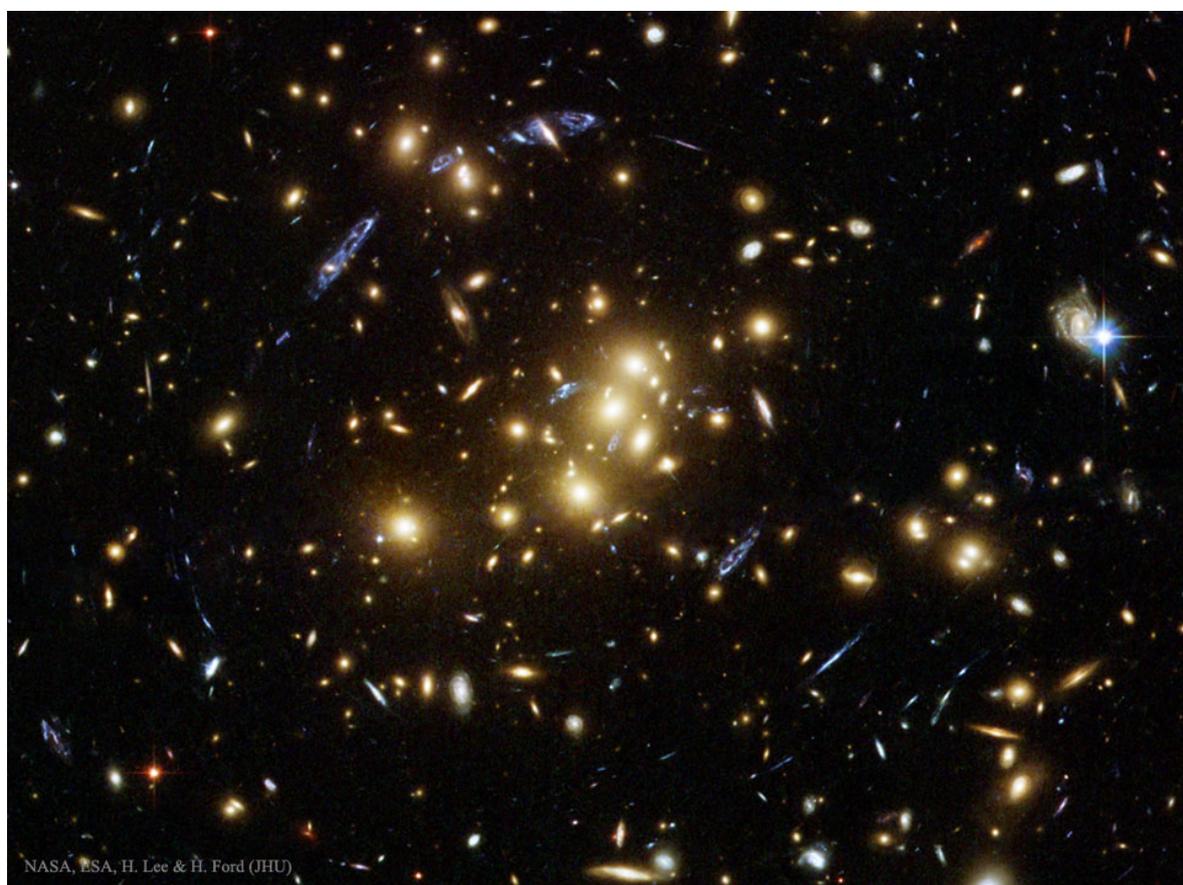
http://www.naturalhistorymag.com/htmlsite/master.html?http://www.naturalhistorymag.com/htmlsite/0907/0907_feature.html

当時は「まさか？」という思いの科学者も少なくなかったのだから、科学界の魔訶不思議な予言の一つでもあって誰も見向きもしなかったのだ。常人の常識を越える理論こそ**人間原理**という壁の向こうが見える端緒についたのではないかと思えてしかたがない。しかも、既存のあらゆる物理理論に関係ないというか、一般相対論はそれらから導き出され得ない孤高の巨峰である。

そこで、レンズ効果が働く銀河団の総質量が一般相対論方程式（宇宙方程式）から計算できることが解った。総質量から見える質量を差し引けば見えない質量が判明するということである。これでダークマターの存在とその重さは観測できることになったのだ。

実際の「重力レンズ」の画像を観てみよう。

巨大銀河団が曲げる、破る <<https://apod.nasa.gov/apod/archivepix.html>>

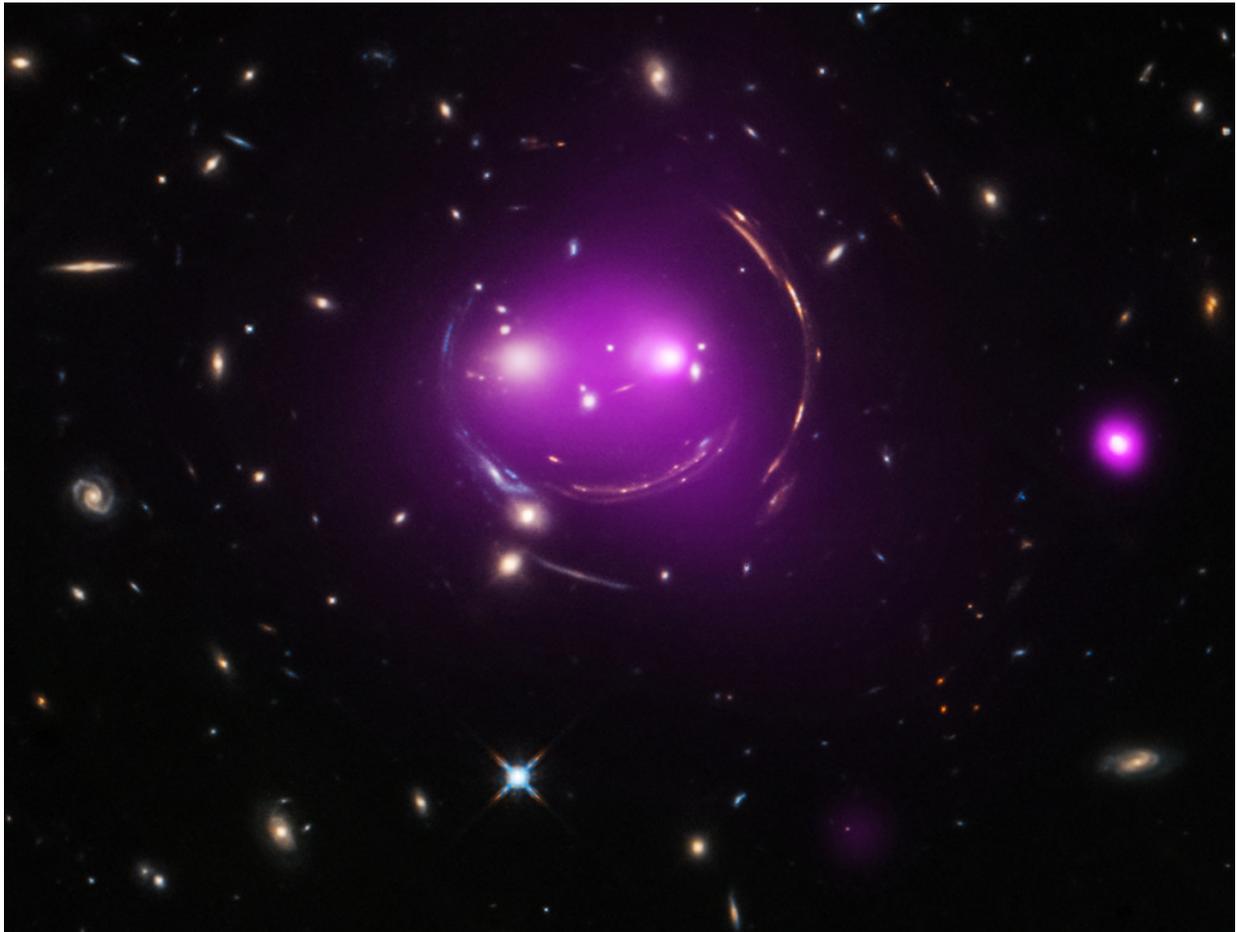


説明： これら変な青いものは何か？ たくさんの輝く青いものは、膨大な銀河団のうしろに並んでいることが起きている一つの、通常でない、ビーズ状の、青い、リング状の銀河から成っている。この銀河団は黄色く、銀河団のダークマターと一緒に、重力レンズのように働いている。重力レンズは背後の銀河のいくつかのイメージを創り出す。ワイングラスの底をとおして遠くの街路の灯りを見るときに歪んだ灯りに類似している。たぶん形成されている背後の銀河の独特な形は、銀河団の中心から4時、10時、11時と12時における別々のイメージを天文学者に推定させるであろう。銀河団のセンター付近の青いシミは、背後の同じような銀河の別のイメージのようでもある。全体に、最近の認められ

ている一つの分析から、11の別々の背後の銀河から33のイメージが認識できる。銀河団 CL0024+1654 の壮観な写真
真は2004年11月にハッブル宇宙望遠鏡が撮ったものである。[筆者訳]

次に、余りにも有名で、これこそ理想的な重力レンズという具体的画像を掲げる。アインシュタインがこれをみたら、自分の予言的の中に仰天するかもしれない。

不思議の国のアリスにおけるチェシャ猫 <<https://apod.nasa.gov/apod/archivepix.html>>



説明：今(2015年11月)から100年前、アルバート・アインシュタインの一般相対性理論が予言した重力レンズ現象が公表された。そして、それこそ気まぐれで登場するこれらの遠い銀河たちを観させてくれる。チャンドラX線宇宙望遠鏡によるX線とハッブル宇宙望遠鏡による可視光線でガラスの底をとおして見えるようなものである。チェシャ猫というあだ名がついた銀河群、つまり二つの大きな楕円銀河のグループは、これ見よがしに複数のアークに縁どられている。これらのアークは、ダークマターが支配的な前面銀河の重力質量の全体分布により歪められた背後銀河の可視光画像である。実際、二つの大きな目の楕円銀河は、その銀河群の合体しつつある輝くメンバーを提示している。それらの相対的な衝突速度が秒速 1,350km で何百万度の熱いガスを生じて紫色で見えるようにX線を放っている。銀河群が合体するとはますます奇妙である。チェシャ猫群のニヤリは、おおぐま座の方向で 46 億光年先にある。

摩訶不思議なレンズ画像である。でも本物なのだ。よくも見つけたものだ。ハッブル宇宙望遠鏡：HST では見つけられないはず。地球からみる夜空（宇宙）は立体角で表すと、 $360^\circ \times 360^\circ = 129,600$ セグメントになる。秒角まで細かく刻めばさらに、 $3600'' \times 3600'' = 12,960,000$ となり、立体角と掛け合わせれば、約 1.7×10^{12} 個ほどの視角セグメントと計算できる。HST がこの小さな域をぜんぶ走査することができるかどうか、実際はさらに $1/1000$ 秒程度に細かく分割しなければいけないかもしれない。いずれにしても何年かかるかわからないし、他の観測をぜんぶ犠牲にしてしまう。

では、50億光年先とはどの程度の細分割セグメントになるか計算できないが、おそらく赤経・赤緯を度分秒の $1/1000$ まで指定をしないと、一発である画像をスナップすることはできないだろう。では、どうして「チェシャ猫」のショットができたのか？

実はこの疑問こそ、HST 運用の基本方針の枢要に迫るものと思う。逆にたどれば、まず、APOD = Astronomy Picture of the Day（今日の天文画像）を例にとると、これは著作権フリーの

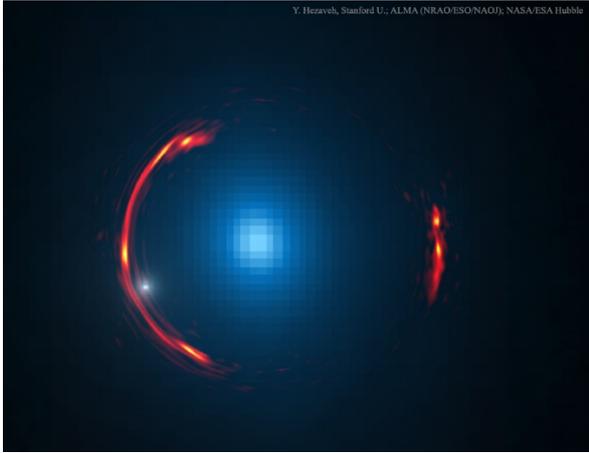
PD:パブリック・ドメイン

として公表している。しかも解像度は他のいずれの望遠鏡の精度の百倍以上あると考えられる。すると、世界中の地上望遠鏡の一つがたまたま見つけた、ぼやけた小さな「チェシャ猫」らしい画像をクローズアップしたいというニーズが出てきて、HST で撮って欲しいとして寄せられる。だから、ピタリと赤経・赤緯が秒角以下で決まっているのであろう。高価で多忙な HST は難なくターゲットに焦点を絞ることができるのだ、と想定される。HST の画像資産がオープンだから利益追求しないから、寄せられる。

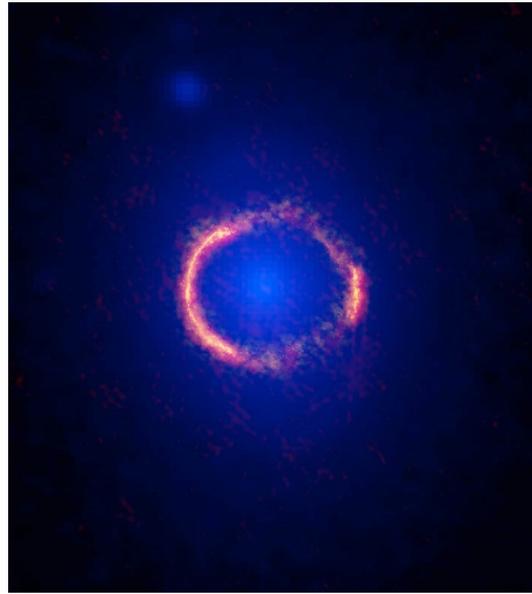
このように想像することも含めて科学的な思考を重ねることにより、HST 画像への賛美と素人的な分析に役立つものとなろう。さらに米国の思想の根本にも触れられる。つまり、高価で貴重な人類資産を困ってしまえば、普及はされずに、研究はおろか学習レベルにも貢献できなくなる。PD として公表すれば、計り知れないほどの人類の英智育成に償却できる。すなわち、宇宙規模に近い巨大な方針であることは間違いない。結果的にわかることは、宇宙の探求は一国や個人が夢中になってもたかが知れているということである。

逆に、アメリカの知的資産が無料で使われて他の国が追いついて追い越されるのではないか、という心配もわくが、それこそ豎子（じゅし）の浅知恵である。ここまで 20 年以上も知的資産が溜まると、その集積効果は絶大であり、吹けば飛ぶような人工島をいくら造成しても大陸にはなりえない。

次に、アインシュタインの重力レンズ現象のもっとも典型的な画像を紹介する。日本が主たるメンバーとして運営している世界最高精度の「アルマ望遠鏡」によるものである。



<https://apod.nasa.gov/apod/ap160420.html>



<http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/news/pressrelease/201504077568.html>

アルマ望遠鏡(オレンジ)とハッブル宇宙望遠鏡(青)で観測した SDP.81。アルマ望遠鏡では重力レンズ効果により引き伸ばされた SDP.81 の姿が、完全な円形に見えています。ハッブル宇宙望遠鏡では重力レンズの原因となっている手前の銀河が見えています。また、アルマ望遠鏡の解像度がハッブル宇宙望遠鏡を上回っていることもわかります。

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO); B. Saxton NRAO/AUI/NSF; NASA/ESA Hubble Space Telescope

SDP.81 はハーシェル赤外線宇宙望遠鏡で発見された銀河で、私たちが住む天の川銀河の約 500 倍のペースで星を生み出す「爆発的星形成銀河」のひとつです。SDP.81 は地球から 117 億光年の距離にありますが、その間(地球から 35 億光年の距離)にある別の銀河の巨大な重力によって SDP.81 から来る光がゆがめられ、その姿は円弧状に引き伸ばされています。アインシュタインが提唱した一般相対性理論の中で予言されたため、こうした円弧は「アインシュタイン・リング」と呼ばれます。

アルマ望遠鏡は、SDP.81 を波長 2mm、1.3mm、1.0mm の 3 波長帯において、塵と一酸化炭素、水分子が放つ電波で観測しました。アンテナの間隔は最大で 15km であり、もっとも波長の短い 1.0mm の観測での解像度は 0.023 秒角に達しました。観測の結果、重力レンズによって引き伸ばされた SDP.81 の像がほぼ完全な円を描いていることがわかりました。一方過去に行われた他の電波望遠鏡による観測では、図 1 の左右の明るい部分だけしか見えていませんでした。これほど完璧なアインシュタイン・リングが捉えられることは可視光観測でも電波観測でもたいへん珍しく、アルマ望遠鏡の高い解像度と感度によって初めて得られた成果といえます。

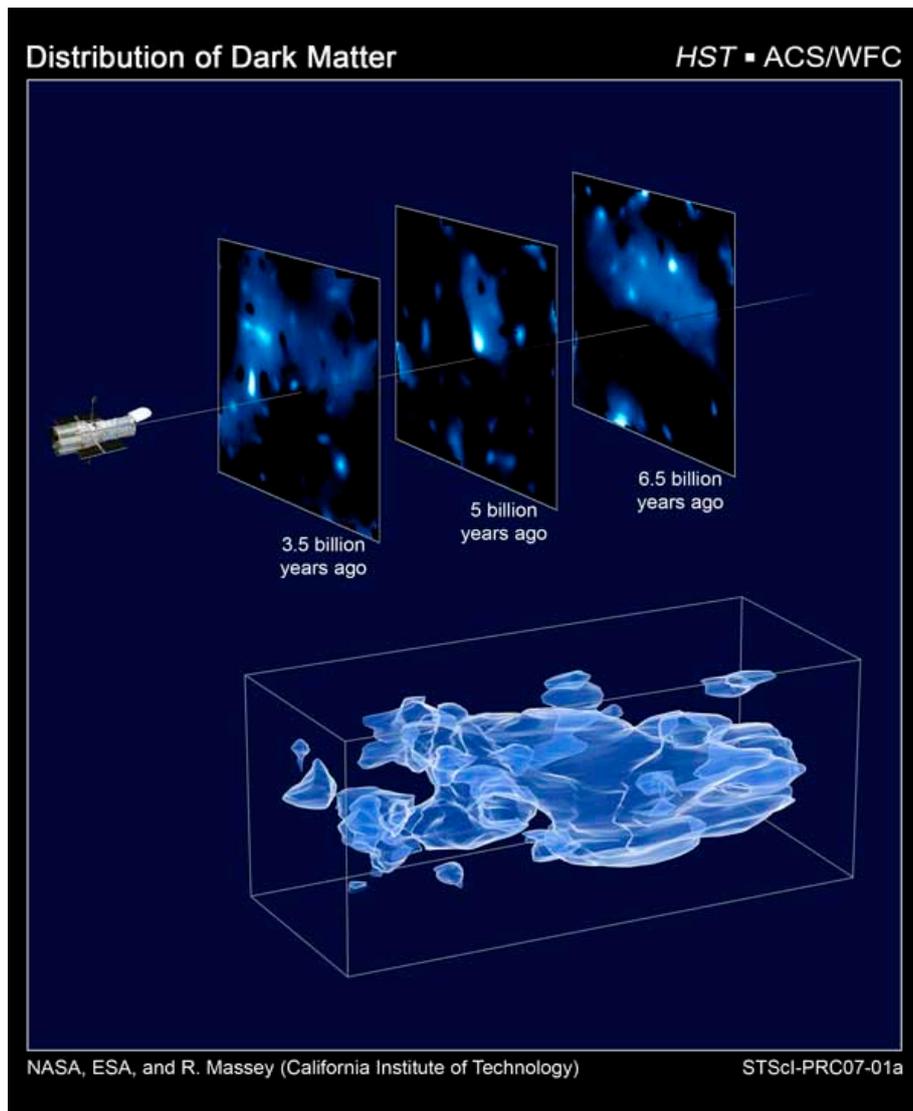
ダークマターの画像

見えないものの画像とは、人を馬鹿にしていないか？ ところが、2007 年以に NASA などがキャルテックの物理学者：R. Massey に先導されて合成写真画像をこしらえてしまった。キャルテックとは、カリフォルニア工科大学（The California Institute of Technology）の略称であり、いまや世界一を争うほど物理学や工学などの科学の英才群を育てて、凄まじい知能たちがダークマターのように集まっている。私もいま 18 歳なら貧乏して飢えても渡米して受験したくなる。

https://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/news/clumpy_darkmatter.html 01.07.07

NASA のハッブル宇宙望遠鏡:HST を使用する天文学者の国際チームが宇宙における最初のダークマターの 3D 画像を創り上げた。

スライスされたイメージは、どのようにダークマターが 65 億年前から 35 億年前までに進化したかを示している。ダークマターは、宇宙の質量のほとんどをカバーしている物質の見えない形態である。下のイメージは、我々の進化中の宇宙においてどんな構造が作られているかという理論をゆっくりと時間をかけて確認されるとともに、ふんわりとしたダークマターを示している。



ダークマターは、宇宙において通常物質のだいたい5倍の全体質量がある見えない姿の物質である。宇宙の付着物のような考えもありうる。見える物質は、恒星と銀河の構造内にあるこの付着物の中に集まっている。ダークマターの最初の直接的検知は、弾丸銀河団(1E 0657-558)の観測をとおして行われた。

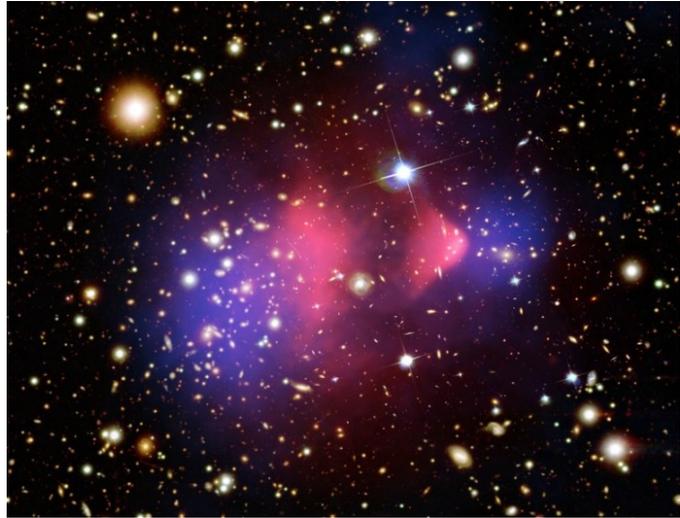
新しいマップは、恒星と銀河を含む通常物質がダークマターの高密度の集結の中に集まっていることを正にその証拠を提供している。ダークマターの空間と時間分布を画像化することは、どのように数十億年にわたって銀河が成長して団塊になったのかを理解するための根源的なことである。このマップは宇宙創成期に半分ほど振り返って引き延ばしており、ダークマターのフィラメント網を露呈している。容赦ない重力のもとで崩壊しながら、時間をかけてこんもりと成長している。

[右下] これらの二つの仮想的カラー画像は、宇宙の通常物質：星の分布(左)をダークマター分布(右)と比較している。こんもりした塊の輝きは質量の密度に対応している。その対照は、絶え間ない重力場の引力のもとで進化している宇宙でどのように形作られたか洞察することを提供するだろう。

これは我々の進化宇宙でいかに造形されたかということの伝統的理論と一貫性がある。それはビッグバンのときに円滑な物質の拡がりから遷移してきたことである。

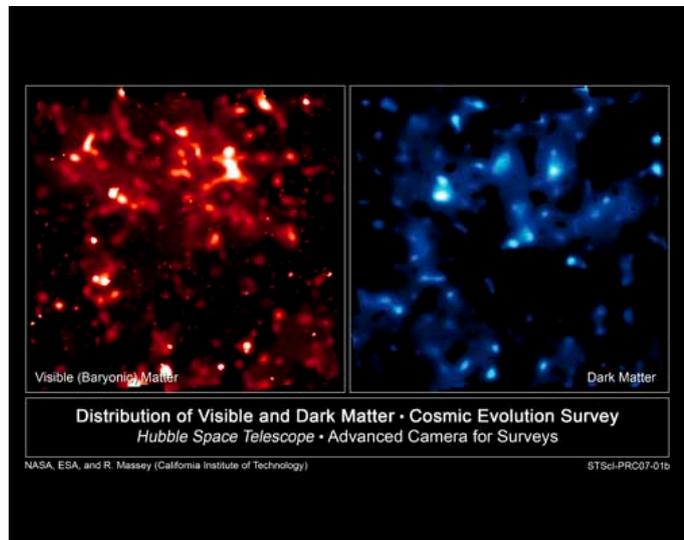
探索者たちは、進化宇宙の探査(the Cosmic Evolution Survey “COSMOS”)という宇宙の年齢を定めるためのハッブル宇宙望遠鏡の大規模探査のデータを用いている。COSMOS の視野は、十分に広大な天空域をカバーしている。

**強い X 線を放つ弾丸銀河団 (1E 0657-56)
約34億光年先、りゅうこつ座の方向**



<https://apod.nasa.gov/apod/ap060824.html>

可視物質(左)とダークマター(右)の分布



明らかな証拠になるようにダークマターの大規模な網状造形のために満月の 8 倍の広域とした。
3D: 三次元構造の距離情報を添えて、ハッブルの観測結果は様々なデータと統合・集約された。
それらのデータは次の天文台で得られたものである。

Europe's Very Large Telescope in Chile; ヨーロッパ VLT

Japan's Subaru Telescope in Hawaii; 日本のスバル望遠鏡

the U.S.'s Very Large Array radio telescope in New Mexico; 米国の大規模アレイ電波望遠鏡

the ESA's orbiting XMM-Newton X-ray Observatory; ESA の X 線宇宙望遠鏡

ダークマター・マップは、25 億光年遠方の諸銀河の形を測ることによって構築されたのである。

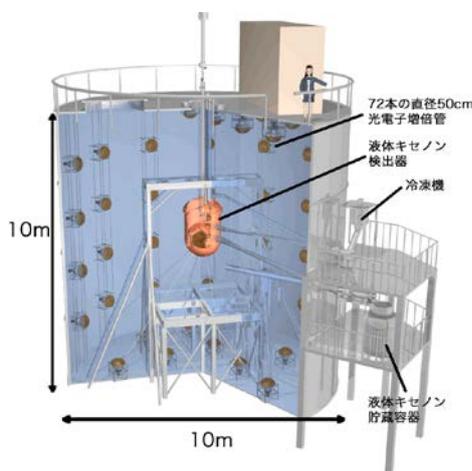
ハッブルに届くのに、それらの光は介在するダークマターを通り抜けて来なければならなかった。そして、光路はダークマターの重力場でわずかに屈折される。観測の結果、銀河形の微妙なゆがみは、ハッブル視線に沿って介在する質量の分布を再構築するために用いられた。それは弱重力レンズ効果と呼ばれるものである。

天文学者にとっては、宇宙を絵図にする挑戦が、街路灯だけで示される夜の地域の複数のスナップから町を絵柄化することに類似している。ダークマターは見えない、そして諸銀河は直接見ることができる。

この新しい絵図は、昼間に最初に見た町を観ることと同等である。そこでは、主な動脈たる道路とアスファルトの道路交差点が明瞭になり、そして近隣の家々があからさまになる。探査はさらに深く宇宙を見入るときに振り返ってみるから、何十年間にわたる街の成長のコマ撮り風景のようでもある。

https://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/news/clumpy_darkmatter.html 01.07.07

ダークマターは、世界中の数カ所の実験施設で依然として発見されていない。我が国でもスーパー・カミオカンデの脇で“XMASS”という東京大学宇宙線研究所の観測実験施設により探索が始められているが、道のりは遠し、である。ひょっとしたら、超新星ニュートリノのように、狙いとは関係ない全く別の実験で発見されるかもしれない。つまり人間原理をダークマターは嫌っているのではないだろうか。



XMASS 検出器は、直径・高さ 10m の水タンクの中央に、直径約 1 m の液体キセノン検出器が設置された 2 層構造で構成されている。

液体キセノン検出器は、約 800kg の液体キセノンの周りを 642 本の光電子増倍管が取り囲み、さらに全体が 2 重の真空容器に入れられている。液体キセノンはマイナス 100 度に保たれており、液体キセノンとダークマターが衝突して放出された光を、周りに配置した光電子増倍管でとらえる。

水シールドタンクは、外部からの放射線バックグラウンドを除去する役割を果たしている。

検出器本体は、約 800kg の液体キセノンが 642 本の光電子増倍管で囲まれた構造。光電子増倍管を支えるホルダーは、五方十二面体(正十二面体の各面の中心を持ち上げ、5つの三角形に分けたような多面体)の形状をしています。さらに検出器は純銅製の 2 重の真空容器に入れられている。

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/xmass/about/status/index.html>

巨大ブラックホール

ブラックホールについては、既に第2回「恒星」において述べたが、それは天の川銀河のなかにあって太陽質量の10倍に満たない、いわば恒星サイズであった。我が国の小田稔博士の“すだれコリメーター”という特殊なフィルターの発明により1970年代に発見された「シグナスX1」である。地球から6,000光年先にある。当時はこれが唯一無二のブラックホールだった。

だが、これだけでは済まなかった。観測技術の発展は私たちの想像を超えて凄まじい成長を遂げてきた。ブラックホール・ハンターとして名高いアンドレア・ゲーズ博士という女流天文学者がその粋たる「大気の揺れ補償装置」と赤外線観測技術を存分に使いまわして、ハワイのマウナケア天文台、世界最大の10m級のケック望遠鏡の威力とその補償装置を縦横無尽に使って天の川の芯にあるらしい巨大ブラックホールを追い続けた。そしてついに、私たちから2万5千光年先にある太陽質量の400万倍という巨大なモンスター・ブラックホールを射止めたのである。1995年頃の出来事であった。



<http://www.physicscentral.com/explore/people/ghez.cfm>

それからというもの、あちこちの天文学者がアンドロメダなどの銀河の中心を探し回った。あたかもゴールデン・ラッシュに沸いた1800年代初期のカリフォルニアのように、地上の天文台の奪い合いとでも言おうか、巨大な獲物のハンティング競争である。ハッブル宇宙望遠鏡も狙われたであろうが、これはこれで厳格な観測スケジュールが管理されているからそこにもぐるすき間はない。我が国はスバルという8m級の望遠鏡をマウナケアに設置したから、悠々としたものである。

そして、雨後のタケノコのように見つけれられてきた。最大のものは太陽質量の170億倍というバケモノまで、昨年NASAによって発見されたという。結果として、全ての銀河の芯には怪物ブラックホールがあることが解ったのだ。

しかしながら、いまだにブラックホールの中身は解析されていない。X線放射とかあくまでも外部に起きる現象だけである。アインシュタインの宇宙方程式でも「特異点」という解しか出てこない。すなわち時空が無限に歪んで重力無限大、かつ時間が止まってしまうとしか判っていないのだ。ダークマターは、通常の空間に飛び交っているから、まだ掴まえようという意欲は湧くが、ブラックホールはあらゆる観測装置がその中に入っても潰れてしまい、観測機能など働きようがない。

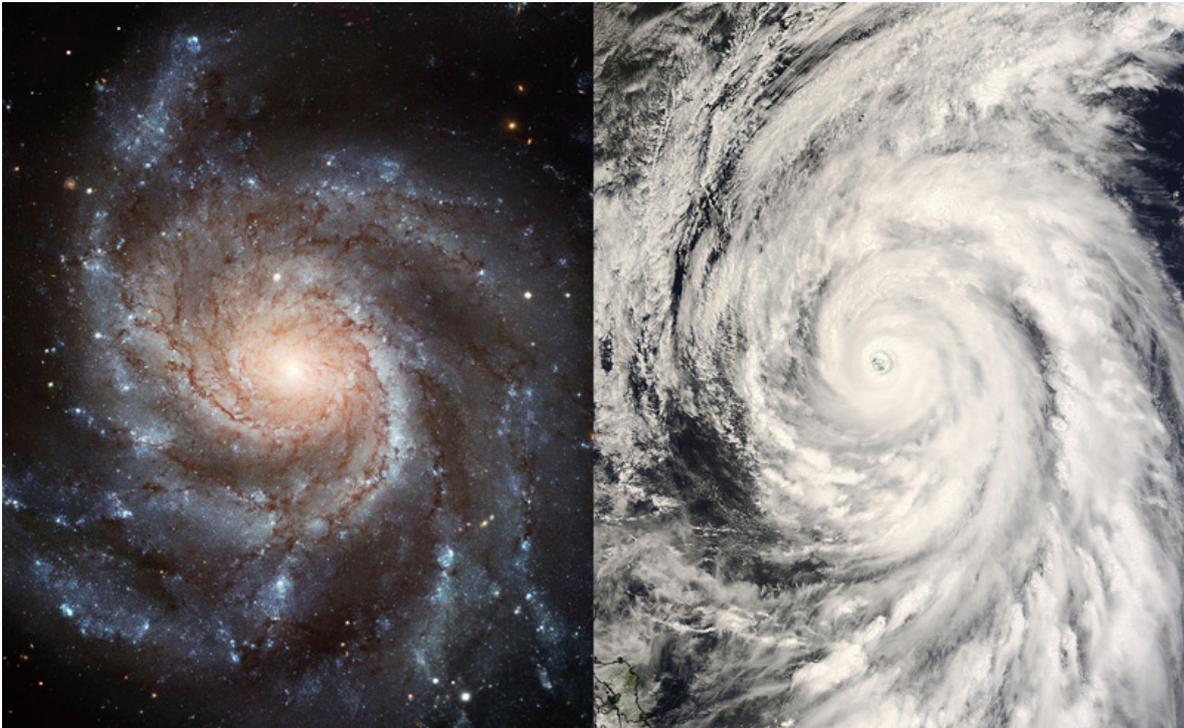
結局は、物質すなわち陽子と電子が潰れる事態の新理論が現れることを祈るしかない。私たちが知りうる究極の物質の塊りは第3回に述べた中性子星までしかない。あと何百年かかるだろうか、第二のアインシュタインの登場を待つしかないのだろうか。

渦巻銀河のかたち

問題はここから始まると考えることが手っ取り早い。渦巻ときけば誰でも鳴門海峡の大渦を連想する。あるいは、私のように蚊が嫌いな人は蚊取り線香を思い出す。数学者や物理学者はその形を幾何学的に表す方程式をおもい浮かべるだろう。そう、ルネ・デカルト（1596-1650）というフランスの哲学者が最初に提起したそうだ。この人はニュートン（1642-1727）の万有引力の概念をそれ以前に否定していたのだ。つまり、遠隔作用ということは何かを通じて働くということが前提であることは、何となく私たちの考えに合う。そのため彼は“エーテル”という見えない怪しきものに真空は満たされており、それで物体間の遠隔作用が行われていると考えた。それに構わずに、ニュートンは地球の引力が遠い月まで働くとしてしまったのである。だから「万有」ということばに意味を込めたのだ。どっちもどっちであろうが、やはり哲学者はそれを許さなかった。だから、ニュートンはまさに天才ならず「画竜点睛を欠く」が如き才人になってしまったのである。ニュートンが開拓したと言われている微積分についても、ドイツのライプニッツ（1646 -1716）が先に定式化して解析という数学の基本を築いたとする識者も多いことはニュートン賛美者には手痛いにちがいない。

19世紀になっても物理学界では、「遠隔作用の媒介」は意外に大きな問題になった。これを見事に説明し解決した天才、というべき理論物理学者こそアインシュタインである。彼は同時にデカルトのエーテル概念も抹消したから、喧嘩両成敗という常識をも全うしたのである。ちなみに、アインシュタインは「重力の作用は空間が曲がるから」と説き、それは空間の特性であるとも唱えた。本当だろうか？ 既に述べたように重力レンズ効果できっぱりと証明されたことは読者諸兄も知っている。かつ、20世紀末に「空間が曲がるのならば空間のねじれ」についても起きるはずとして、米国の科学者たちはそのために衛星を打ち上げ、地球周りの重力場がその自転で引きずられて振じれることを観測し、検証した。ただ、最後の証明「重力波」だけは世界中の実験物理学者が奮闘中にある。米国のライゴ：LIGO プロジェクトや、日本の建設中のKAGRA 重力波望遠鏡（於：神岡鉱山）が有名である。これらについては、本シリーズの最終版にて述べるつもりである。

このように、私たちは何故か頭の片隅にあつて、刺激を受けないと出てこないものがある。その一つが本題の「渦巻のかたち」であろう。どうして渦巻になるのか？ 次頁に示す驚きの対比画像を掲げる。宇宙とちっぽけな地球の表面で起きていることが、実は見事に対照されるのである。



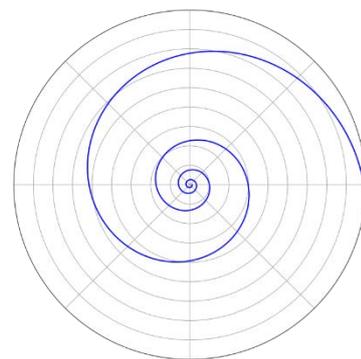
[説明] 不快極まりなく終わった台風ラムサム(右)と2.5千万光年先の銀河 M101 は、多くの共通点があるようにみえない。まず、M101(通称:風車銀河)が17万光年に拡がり、ラムサムは数千 km 程度しかない。この規模はおおいに似つかわしくない。それらの形成と発達を支配する物理的な環境が異なることを言わなくても。しかし驚異的に似ているように見える。それぞれが、中心から距離的に膨れる幾何学的に成長する対数渦巻として知られている単純で美しい数学的曲線を有している。等角螺旋、成長螺旋、そしてベルヌーイ螺旋が驚異のスパイラルとしても知られているように、この曲線の豊かな特性は17世紀の哲学者デカルト(1596-1650)に発見されて以来数学者を魅了してきた。興味深いことに、この抽象的な形は、上の衝撃的な比較画像で提示されている以上に自然の豊かさはものすごい。例えば、対数螺旋は気泡内の準原子的粒子の軌跡、ヒマワリの種子の塊やカリフラワーももちろん、それらを表現している。

<参考> 対数螺旋(logarithmic spiral)とは、自然界によく見られる螺旋形の一つである。等角螺旋、ベルヌーイ螺旋ともいい、幾何学的には右図のよう。オーム貝やアンモナイトなどの殻の形が典型。

<http://www.wikiwand.com/ja/%E5%AF%BE%E6%95%B0%E8%9E%BA%E6%97%8B>

対数螺旋の式： $r=ae^{b\theta}$ ($r \cdot \theta$ の極座標系)

ピッチが10度の対数螺旋



不可思議な現象である。アンドロメダ銀河がどうして渦巻くのか、そしてどのように巻くのか考えたこともないが、そんな渦巻の数学的記述があったのだ。それが、見事に台風と風車銀河の形を対照している。私たちの天の川銀河もその変形であるのかもしれない。

そんな想像は本題の核心ではない。台風の目を見て欲しい。そこは強烈な低気圧の塊りである。仮に風車銀河の核が極端な低気圧、物理学的には強大な重力の塊りだとしたら、対数螺旋として相通じるものが連想できる。

そう、ブラックホールがそこにあるかもしれない。

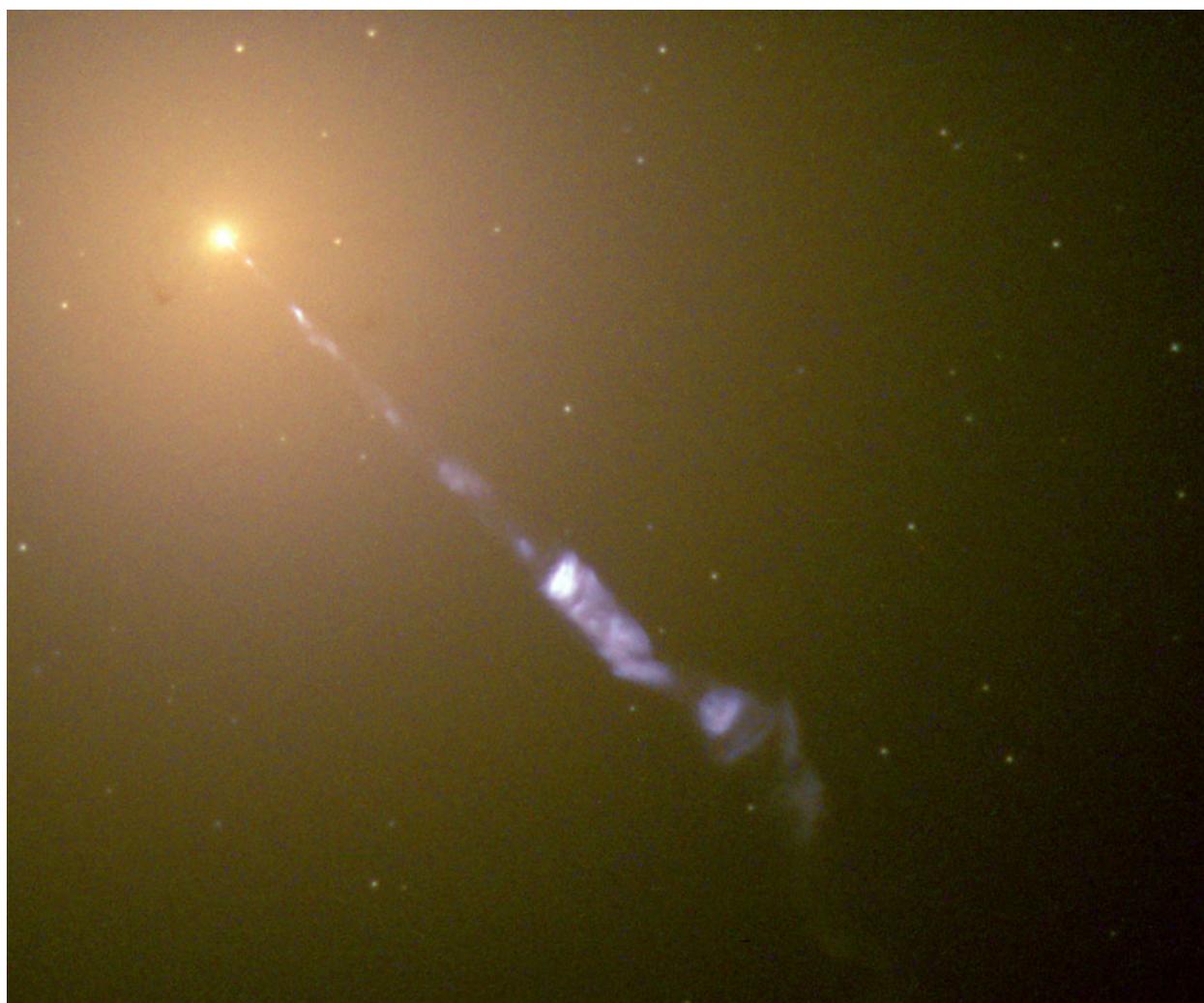
そんなことを空想させてくれる壮大な対比画像である。これは天体物理学者なら誰しも瞬間的に発想したことが目に浮かぶ。発見の原点は発想や空想にあることは誰しも否定できない。否定したとしても、では、何から発見という壮大な夢の実現という汗だくの冒険が出来たのであろうか、ということについて説明してくれない。哲学的にいえば、否定というのは自らを否定する運命にある。とある哲学者が「この世に真実は無い。」と断言したが、他の哲学者から「そのことすら真実ではないのではないか。」と反論されて窮してしまったというエピソードを聞いたことがある。

巨大ブラックホールの所在

次の HST 画像を見れば、巨大ブラックホールの所在は疑いない。ブラックホールはその周りにガスを集めて渦巻くことは、第 2 回に述べた。渦の回転力はブラックホールの生成時に恒星が自転していたからであり、それが小さくなったときアイススケートのスピンと同じように回転数が一挙に上がる。ブラックホールに落ち込むガスやチリは強烈な渦に巻かれながら吸い込まれるのである。同時に、ガス内のイオンのような荷電粒子が回転軸に沿って強力な磁場を造るが、その磁力線さえもひねられてコイルのように巻かれてしまう。するとその中には強烈な電場が出来て、電子や陽子などの荷電粒子がジェットで噴出される。

A Jet from Galaxy M87 2011 August 28

<https://apod.nasa.gov/apod/archivepix.html>



[説明] M87 楕円銀河の中心から吹き出ている異常なジェットは何が発しているのか？ その異常なジェットは20世紀初頭には気付かれていたのだけれども、その正確な原因は今なお議論されている。1998年にハッブル宇宙望遠鏡により撮られた画像には、詳細が示されているが。最も一般的な仮説として、銀河の中心にある非常に重いブラックホールの周りに旋回するエネルギー豊富なガスによって生じるジェットということが有力である。結果的には、光速に近い速度で電子が発射された5千光年もの長い噴射火炎である。それは螺旋磁場の間にて不気味な青い光の噴射である。M87 は、おとめ座銀河団の辺りで5千万光年先にあり、M87の中心周りに光るかすかすないくつかのシミは、遠い昔の大きな球状星団である。

次の画像は、捩じれる磁力線の様子がうかがえる。電場と磁場は交互に生成される。真っ直ぐな電線を直流が通ると周りに丸い磁力線が生じ、磁力線が直線でまとまるとその周りに電気力線が丸く生じる。電子や陽子などの荷電粒子は電気力線に沿って移動する。電子などが回転すると電波を発する。周期が極端に早くなれば X 線を放射して、それを観測すれば物凄い急速回転の現場が観測できるのである。電波とは磁場と電場の変化が相互に起きるから生じる。ゆえに電磁波という。電子などが定速でも回転すると変化になり、周りに変化する磁場が生じてまた変化電場が起き、それが繰り返されるのが X 線や可視光もカバーする電波なのである。

このような磁場の効果により噴出されるジェットの様について、太陽質量の 10 億倍もあるような超巨大ブラックホールのイラストが、次の画像のように NASA/JPL のチームにより作成され公表された。

Spin up of a Supermassive Black Hole 2013 March 12

<https://apod.nasa.gov/apod/archivepix.html>



[説明] ブラックホールはどのくらい速く回るのか？ どんな通常物質でも速く回りすぎれば、それはバラバラに壊れる。ところがブラックホールはバラけないのかもしれない。最大スピン速度は実際には判らない。理論家たちは、アインシュタインの一般相対論のカー解で回転ブラックホールを即座にモデル化して、それがいくつかの驚くべき異常なことを予言する。だぶん、その最も試験可能な予言は、最大限に回転するブラックホールに入っていく物質が、遠くから観たら光速に近い速度で軌道を周っているのが最後にみえるはずということである。この予言は、最近、NASA の NuSTAR と ESA の XMM 衛星で渦巻銀河 NGC1365 のセンターの超巨大ブラックホールを観測することによってテストされた。光速限界に近い速度は、降着円盤の囲いの内側の縁に熱をもってスペクトルが広がった核放射を測定して確認された。上の画像化されたものは、美術家のイラストレータが、頭から放出するジェットも含めてブラックホール周囲の回転する通常物質の降着円盤を描いている。ブラックホールに不規則に落ち込む物質はこれほど上昇回転することはないから、NuSTAR と XMM の計測は周囲の降着円盤の存在をも実証している。

<注> 一般相対論のカー解(Kerr solution)：あるいはカー・ブラックホール解とは、一般相対性理論におけるアインシュタイン方程式の厳密解の一つで、真空中を定常的に回転する軸対称なブラックホールを表現している。ニュージーランドの数学者ロイ・カー(Roy Kerr)によって1963年に発見された。

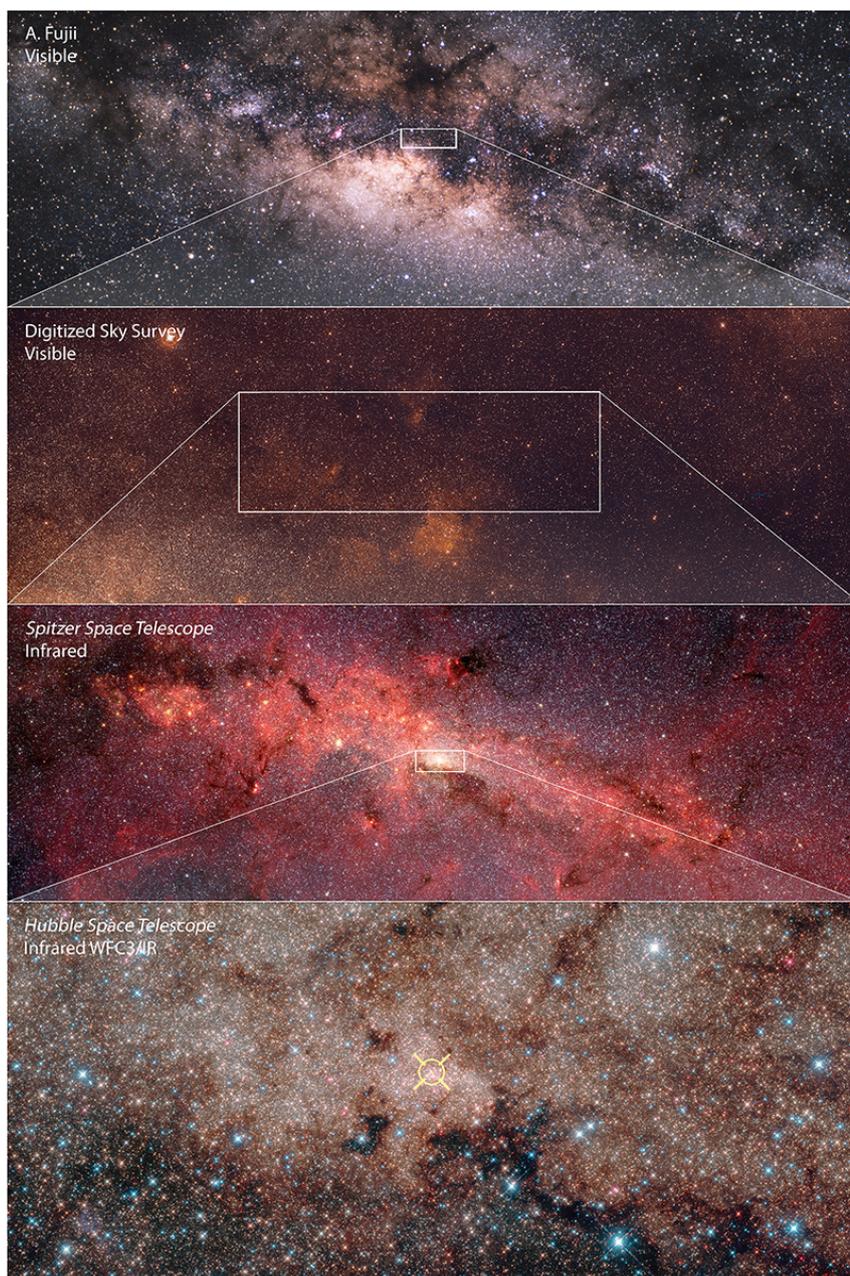
アンドレア・ゲーズの探求 <http://www.physicscentral.com/explore/people/ghez.cfm>

UCLA : the University of California Los Angeles

私たちの天の川銀河の中心部に隠れている大きな天の深い淵がある。近づいて来るものは何でも飲み込むことができる。それはありふれた光景の中に隠れて、その引力はおもちゃのように星々を引っ張り回すに十分な強さがある。カリフォルニア大学ロサンゼルス校：UCLAにおけるチームがその秘密を整然とした方法で暴こうとしている。非凡なブラックホール・ハンターであるアンドレア・ゲーズに会ってみよう。

ブラックホールを直接見ることは不可能である。ブラックホールは、かなり強い重力を持ち、光さえ逃れられない、それ自体を真っ暗にしてしまう宇宙の対象物なのである。その重力場の引力はかなり強いから、物質はその束縛から逃れようとして不可能なのに光速よりも速い速度で旅立とうとしている。

天の川銀河の中心部



<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2016/hubble-s-journey-to-the-center-of-our-galaxy>

しかしながら、ブラックホールが恒星のような明るい物体のそばにあるとすると、その恒星の動きを観測することはブラックホールの秘密の錠を開ける鍵となる。

それこそゲーズがやったことなのだ。彼女は、ハワイにある強力なケック望遠鏡を天の川銀河の中心に向けて練習を積んだ。その周囲にある恒星の動きを観察することによって、そこに

あると思われたブラックホールを知り得るかもしれないと。天の川銀河中心の星々を観てもた易いことではない。

「地球の大気で天体の視界がぼやけるのだ」とゲーズが言った。「まるで流れている川で川底の小石を見るようなのだ、ぼやけている。だから、よく見たいなら、その川の流れを止めて見る必要があり、それこそ我々が補償光学“Adaptive Optics”でやったことなのだ。」

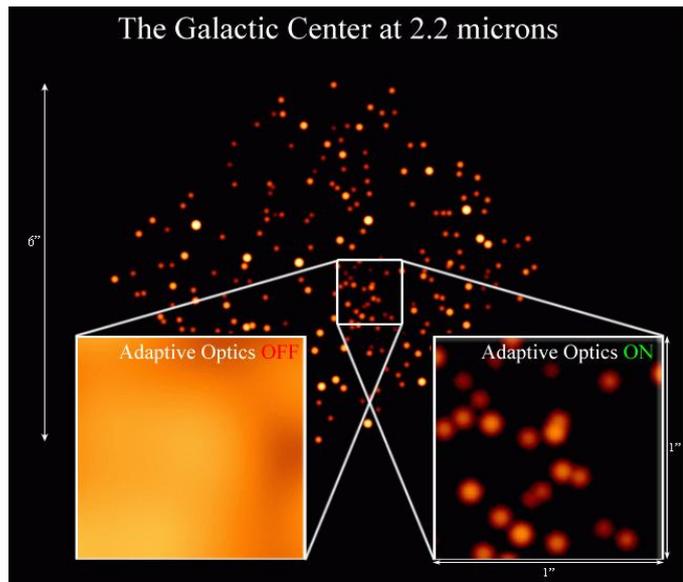
本質的には、補償光学は星の光のチラツキを取ってくれる。天空の星々は、我々の惑星の気圧と温度が絶えず変化して星の光を歪ませるから明滅しているように見える。

[参考]

レーザー光を用いた補償光学機能を導入して天の川銀河の中心部を観測した画像(右)。

補償光学装置を OFF と ON にした場合の画像を対比され、画像の解像度の違いが明解である。

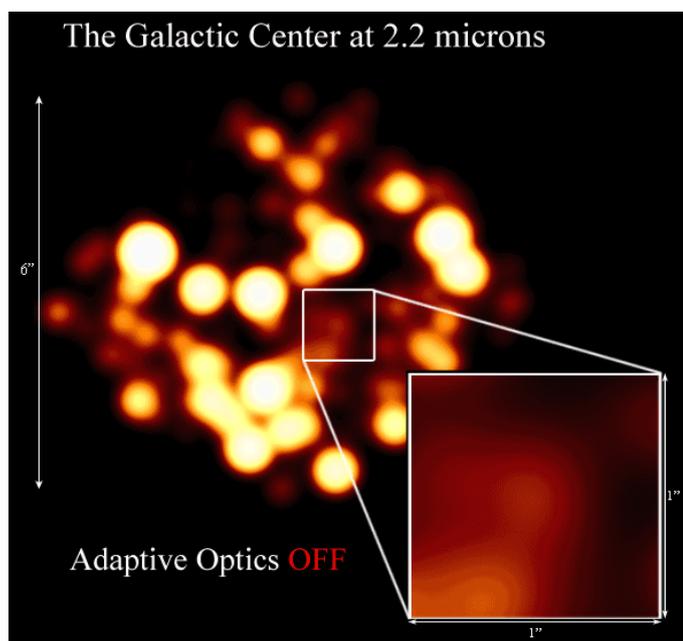
なお、背景の画像は ON の状態で撮られている。

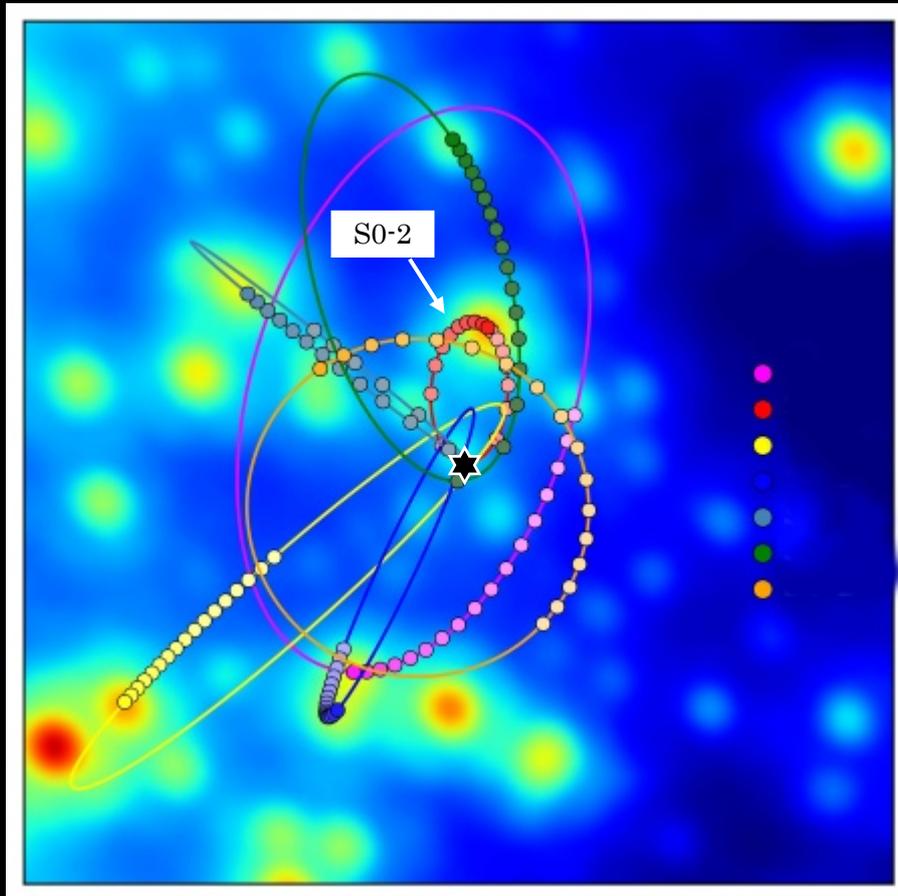


<http://cosmos.physast.uga.edu/iSong/node/89>

実際には、右の画像が補償光学機能を OFF にしたときの天の川銀河の中心部の画像である。

この大気の揺れを克服するため、ゲーズと彼女のチームは強力なレーザー光線を研究対象の恒星に向けて大気の中に貫通する。レーザー光線は空にというか大気の中に天文学者たちが人工恒星と呼ぶ点をあぶりだす。





天の川銀河の中央部分の地図。1995年から2008年までの間に観測したいくつかの明るい星の動きがプロットされている。軌跡を見ると、姿は見えませんが非常に質量の大きな天体がそこにあり、星たちはその周囲を回っていることがわかる。背景の画は、1回の観測で見える恒星の位置を示している。(A.Ghez, Keck/UCLA Galactic Center Group)

<http://natgeo.nikkeibp.co.jp/atcl/web/15/031000004/041600002/?SS=imgview&FD=1129613155>

コンピュータがこの人工恒星の動きを追い掛け、望遠鏡の反射鏡を1秒に数千回も微妙に動かして大気の歪み（ぼやけ）を修正する。「1秒の10分の2～3毎に変わるサーカスのビックリハウスの歪んだ鏡を大気の中に立てたようなもので、さらにかなり速く変化する位相共役ビックリハウスの歪んだ鏡を採り込んだようなもの。」とゲーズが言った。

ケック望遠鏡における補償光学装置から出るレーザー光

Keck I & II on the first night of their dual lasers, as seen from the Subaru Telescope.



<https://www.photonics.com/Article.aspx?AID=47411>

レーザー光が大気の歪み（ぼやけ）をきれいに拭いて銀河の真ん中への視界を明瞭にした後に、ゲーズと彼女のチームはデータを取り始めた。銀河の中心はその外より、つまり我々の太陽系がいる場所よりかなり異なる場所である。中心部から約26,000光年もあるここは、一番近い恒星が4光年はなれている。

天の川の中心において、数十の恒星が同じ領域を素早く動いているのが見える。特に一つの恒星は15年に1回で我々の太陽系と同じ規模の軌道を周回していた。太陽から一番遠い惑星の海王星をとりあげると、それはほぼ165年で同じスケールの軌道を回っている。

何がその速い動きの恒星を周回させているのか。ゲーズは星々の軌道をプロットして、大きさと速度の数値を記録しながら16年間も星々を追跡した。それら全部がたった一つの点を周回しているが、そこには望遠鏡で何も見えてこない。ゲーズと彼女のチームはブラックホールに違いないと断じた。

途方もなく大きな速度で動かすためには、そのブラックホールは巨大であるはずである。ゲーズは、重力場の引力が投石器で投げ飛ばすように回して、その見えない点が

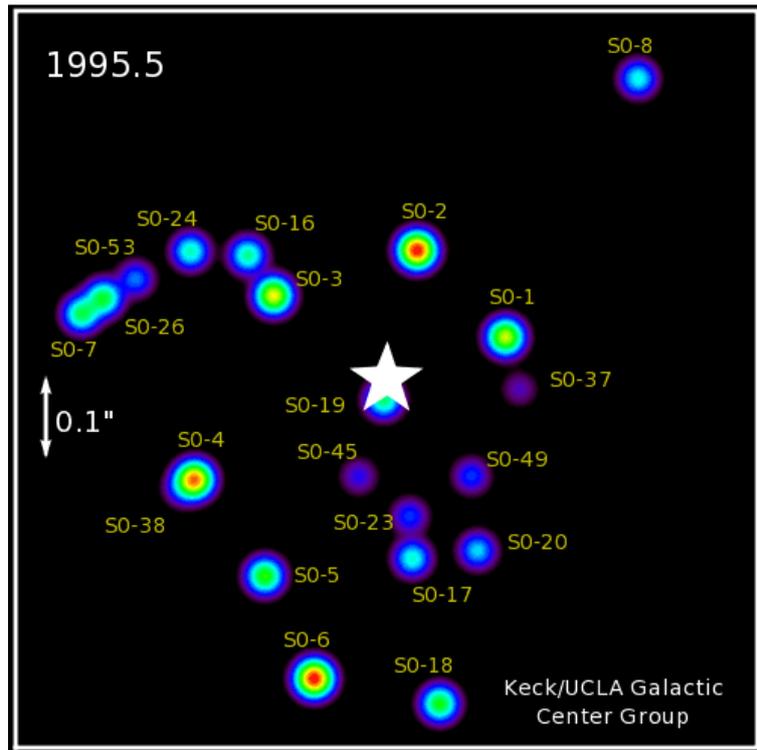
太陽の4百万倍

の質量を持つはずと計算した。ほかの言葉にすると、そいつが巨大な質量をもつブラックホールであろう。チームは、ブラックホールがそこにあると最初に確信することができた。いまや疑問はどこから来たのかということになった。

<始め>

アニメーション (動画) の
始まりと終わりの静止画：

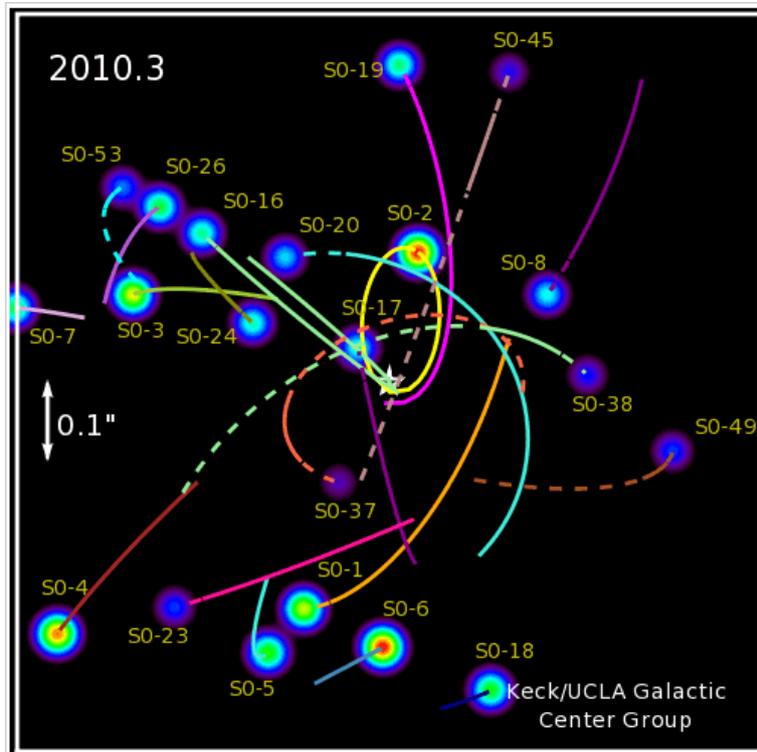
銀河の真ん中にあるブラ
ックホール (☆印) のまわり
を周回する星々の軌道。



<終わり>

最高注目度は S0-2 であ
り、この周回軌道がケプラー
法則どおり見事な楕円軌道
を描いている。その軌道はニ
ュートンの運動方程式で正
確に記述されているから、楕
円中心にある見えない天体
の質量が太陽の 400 万倍と
計算できた。

他の恒星の軌道は、その計
算を裏付ける意味がある。



私たちの太陽の 3 倍 (30 倍の誤謬) ほどの星がその生涯の最後に達する時から伝統的なブラックホールは形づくられる。天変地異的な爆発において、超新星がそのコアを無限小の点に

収縮して噴火する。ほとんどの銀河の中心部におけるブラックホールは、しかしながら、普通のブラックホールではない。

「銀河の中心部で見つけられた太陽の百万倍～10億倍の質量をもつ巨大なブラックホールは、理論では予言されなかった。それらは観測で発見され、今の我々の仕事は、どのようにそれらが形成されたかを解明することなのだ。」

とゲーズは言った。

ほかの神秘的なことも浮かび上がってくる。星々は宇宙に浮遊するガスやチリが合体して熱核融合によってかわる時に形成される。一つのブラックホールは、発育中の赤子の星にとって恐ろしい場所になる。というのは、物質が集まるそれらの場所でそれはいつも引っぱり込むからである。ゲーズと彼女のチームは、ブラックホールの周りの軌道をたどる星々の類いを見つめている。

「予言は若い星でなく、たくさんの古い星にあてはまる。それでも、我々が見ているものは多くの若い星で古い星は少ない。まさに反対だ。それこそが研究の醍醐味なのだ」

とゲーズが言った。

彼女の研究のために、BBCの学習チャンネル、ヒストリー・チャンネルやPBSのようなTVショーにも出ていた。2009年6月に、ゲーズは英国オックスフォードのTED年次会議にて彼女の研究成果について講演した。

「それはかつてしたようなものとは違った話であった。」と彼女は言った。「私は二つの解説演題を与えられた。一つはぴったり18分のお話しか出来なかった。そして二つ目は、私のOHPシートで何の言葉も用いなかった。ありふれたお話、人がやるかもしれないお話とは全く違っている。というのは、我々はスライドの言葉に囚われがちだから。しかし面白かったし、異なる教養の人々に会うことはものすごい経験だった。」

ゲーズは、若い時の大きな影響の一つは、ニール・アームストロングが月を歩いた初めての人類になった時であった。彼女は一時、バレエ・ダンサーになれるよう成長したかったが、最初のムーンウォークの感激に染まってしまった。学校では、彼女はいつも科学と数学の科目が好きで、暇なときにはパズルを解いていた。彼女はMITで物理学士号をキャルテックで博士号を受けるために大学に行った。

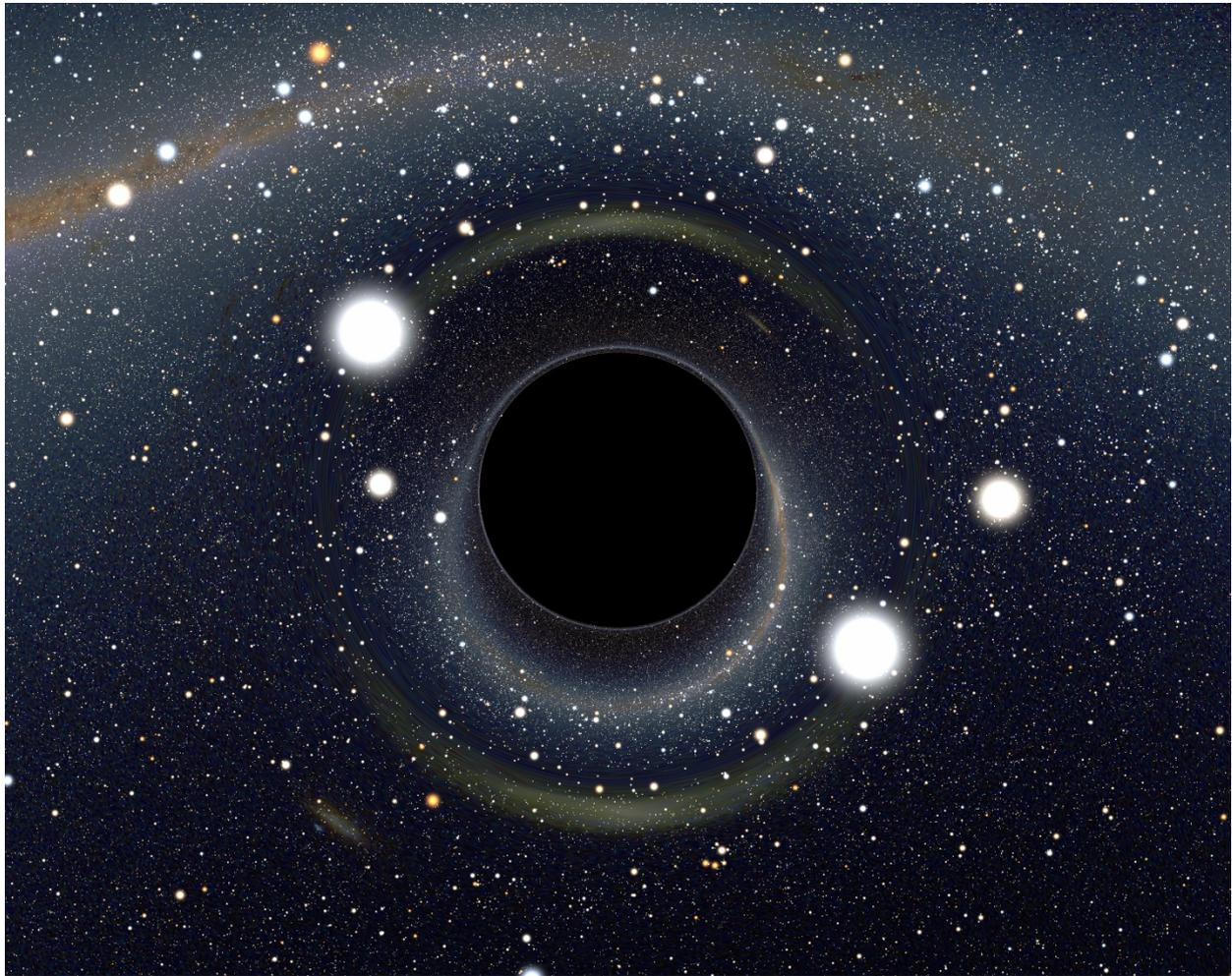
「今日では私は科学と研究を大きなパズルとして考えている。それはけっこう面白いし、あなたただって正解を求めて働かなければならないのだ。」と彼女はいった。「私は、あなたが“すべてはどのように始まるの?”という大きな質問を尋ねるから、いつも宇宙物理学に引っ張り出される。それらが私を夜中まで縛っている。」

<http://www.physicscentral.com/explore/people/ghez.cfm>

1995年の論文発表以来、ゲーズの観測・研究は、かつてない宇宙の観測競争を巻き起こした。けれども地上最強のケック天文台を使っていることは最大の強みであり、かつ、その最強の武器を使える位置を占めていること事態こそアメリカ的厳しい評価を受けていることに気付かねばならない。

なお、天の川銀河中心の巨大ブラックホールは噴出ジェットが観測されていない。これは、どうも休眠中というか、周りにガスやチリが無くなってしまったからとされている。

ブラックホールのイラスト:NASA



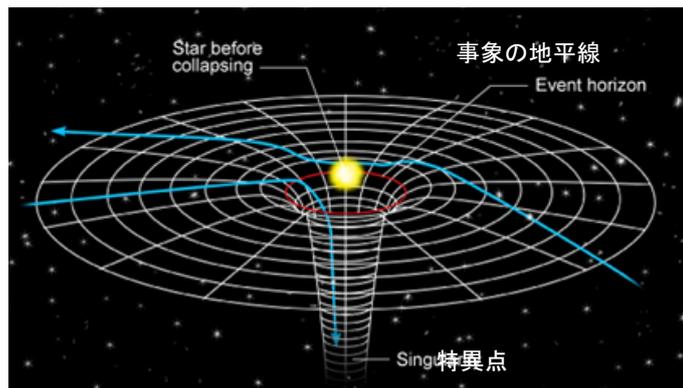
<https://apod.nasa.gov/apod/ap141026.html>

ブラックホールの外部特性

誰もブラックホールの中身を解明してくれていない。誰もその中を観測できない。これからも永遠にこの状態は続くのであろうが、語り部の私は困っている。それでも中身が解らないのなら、外形だけでも述べなければならない。

アインシュタインの一般相対論方程式の解として得られたブラックホールの「特異点」という謎に対して、これまで世界の英才たちが挑戦した結果はいずれも外部特性であるが、次の四つに絞られよう。

- ・シュヴァルツシルト半径
- ・回転ブラックホールのカー解
- ・ホーキング輻射
- ・ジェット噴射のシナリオ



<https://medium.com/@yasengog/looking-at-a-black-hole-c1e25064a049#.28rbd42bt>

① 一般相対論方程式

一般相対論方程式は次のようであるが、私たちの理解を超えている。あたかも、高度な知識を持つ宇宙人が来て、不可解な宇宙語でしゃべりまくる暗号みたいなものでもある。しかも、世界中のあらゆる漫画家やフィクション作家が、ダジャレにも使えない代物でもあり、「それみたことか」と言いたくなる。

あの「対称性の自発的破れ」でノーベル賞に輝いた南部陽一郎博士（1921-2015）が絶賛していた美しい方程式である。これは別名「宇宙方程式」とも言われる。

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

リッチ・テンソル スカラー・テンソル 重力テンソル

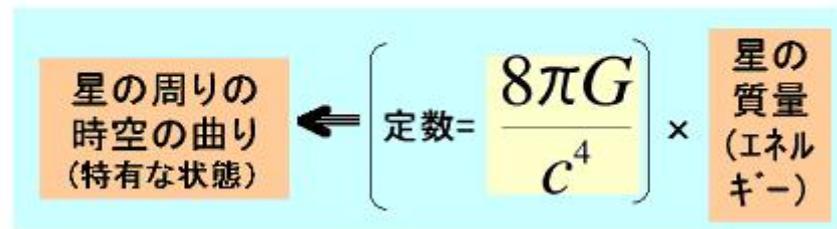
左辺の第1項がリッチ・テンソル、第2項がスカラー・テンソルで、右辺が重力テンソルと言われている。個々の意味は私も説明できないが、そのまま記憶するだけが唯一の抵抗である。理論物理学を目指す高校生こそ、頭脳の吸収率が最高最大なのだから、大学に入ったら正座して真っ向から挑戦することを願望する。そのためにも級数展開や連立方程式を微積分同等に学んでほしい。

次のような分かりやすい克明な解説図もある。

アインシュタインの重力方程式

$$R_{ij} - \frac{1}{2} g_{ij} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ij}$$

リッチ・テンソル (R_{ij}) 計量テンソル (重力ポテンシャル) (g_{ij}) スカラー曲率 (R) 円周率 (π) 重力定数 (G) 光の速度 (c) エネルギー運動量テンソル (T_{ij})



<http://www.seibutsushi.net/blog/2012/02/1263.html>

感覚的な把握だけではあるが、私の場合を紹介しよう。

まず、ベクトルとは、幾何的な図において矢印で示されるように力の方向性がある。その方向を曲げようとする曲げられまいとする力が働く。例えば、高速回転するコマは最初に回転した自転軸は変化しない。だから地球ゴマは斜面でも傾かない。このため、ジャイロとして宇宙におけるロケットの姿勢制御に使われる。一度回転したらその回転軸は頑として動かない。人間にもそんな人がいるように。車の運転でも気付こう。速度を上げて急に曲がればドライバーはひっくり返る恐怖感覚があるから、思ったほど曲がれずにセンターラインをオーバーして対向車に正面衝突する悲劇的事故になる。そんな感覚がベクトルという物理的数学概念にはあるということなので理解しておこう。対語となるスカラーとは、単なる数であり、例えば質量とか距離とかである。

次に、テンソルはそのベクトルの概念を拡張した幾何学的な量である、と辞書には載っているが、具体的には私も掴めてはいない。ただし、テンソルは行列：マトリックで数学的に記述される。現実的には XYZ 座標系の格子模様をイメージすればよいと考えられる。豆腐を横に縦に切るように空間を刻む概念なのだが、豆腐と同じように空間も、重力によりフニャフニャしているから、いつもきれいに正方形に切れるとは限らない。テンソルはそれを表したものと解釈できる。

$$\overbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu}}^{\text{空間の記述}} = \overbrace{8\pi GT_{\mu\nu}}^{\text{重力場の記述}}$$

この物理的意味合いは、右辺の重力が左辺の4次元空間を決めるということである。4次元空間とは、私たちが生活している空間、例えば部屋の寸法が縦×横×高さで3次元である。そこに時間を重ねると次元は四つになるので、アインシュタインはこの世のこの宇宙の空間を「時空」と定義した。つまり、そこに太陽（右辺）があると、その周りの空間（左辺）が決まり、逆に、曲がっている空間があれば、重力場が計算できるという理屈である。等号“=”とは、双方向であることに留意されたい。

具体的には、重い太陽があればその周りの時空は歪（ゆが）み、反対に、見えない何かがあって時空が歪んでいるとそれを測定すれば、見えない何かの重力（質量）が判ることになる。後者の例が既に述べてきたダークマターやブラックホールとなる。

いまだから多くの書物があってそれらを読めばズブの素人でも語れるが、これが発表された1915年(大正4年)当時は何が何だか教職者も含めたインテリの理解を超えていた。

② シュヴァルツシルト半径

1916年、ドイツのカール・シュヴァルツシルトは、1915年に公表されたばかりのアインシュタインの一般相対論方程式の特殊解を求めた。驚くべきことである。曲面や曲体に適用できるリーマン幾何を苦勞して10年間も学習して採り入れて出来上がったのがその方程式である。凄まじい学識レベルだったのだ、当時のドイツは。

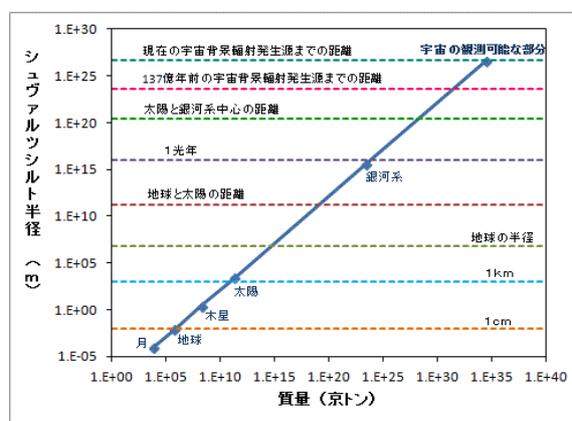
非常に小さくて重い星があったとすると、その星の中心からのある半径の球面内では曲率が無限大になり、光も脱出できなくなるほど曲がった時空領域が出現することに気づいた。その光がUターンしてしまう半径を**シュヴァルツシルト半径**またはシュヴァルツシルト境界面と言い、その天体はブラックホールと呼ばれるようになった。これが最初のブラックホールの外部条件の一つとなり、その大きさが定義されて今でも通用している。

アインシュタインの方程式から導き出されたシュヴァルツシルト半径 r_s は、想像以上に平易な式になる。

$$r_s = 2GM / c^2$$

G は重力定数、c は光速、M は質量。

例えば、太陽がブラックホールになるとすると、その半径は約3kmになってしまう。地球はなんと1cmほど。



<http://www7b.biglobe.ne.jp/~ykoba/blackholesize.html>

ちなみに天の川銀河中心にある巨大ブラックホールの半径を計算してみよう。

ブラックホールの質量は太陽質量の 400 万倍

太陽質量： $2 \times 10^{30} \text{ kg}$

重力定数： $6.674 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

光速： $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$

シュヴァルツシルト半径 r_s

$$= (2 \times 6.674 \times 10^{-11} \times 4 \times 10^6 \times 2 \times 10^{30}) / (3 \times 10^8)^2$$

$$= 11.86 \times 10^9 \text{ m} \approx 12 \text{ 百万 km}$$

太陽の半径が約 0.7 百万 km だから、だいたい 17 倍もある。水星の公転軌道の平均半径が 58 百万 km であり、それまではいかないが、物凄い大きさであることは確認できた。

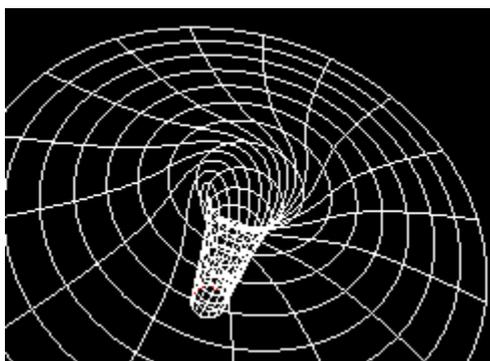
なお、シュヴァルツシルト半径でブラックホールの表面があるとは誰も言えない。ただし、その半径で区画される球面をシュヴァルツシルト境界面ともいうが、一般的には「事象の地平面」と呼ばれる。ブラックホールの中から光は出ることが出来ない为中が見えないから地平線になぞらえている。

③ 回転ブラックホールのカー解

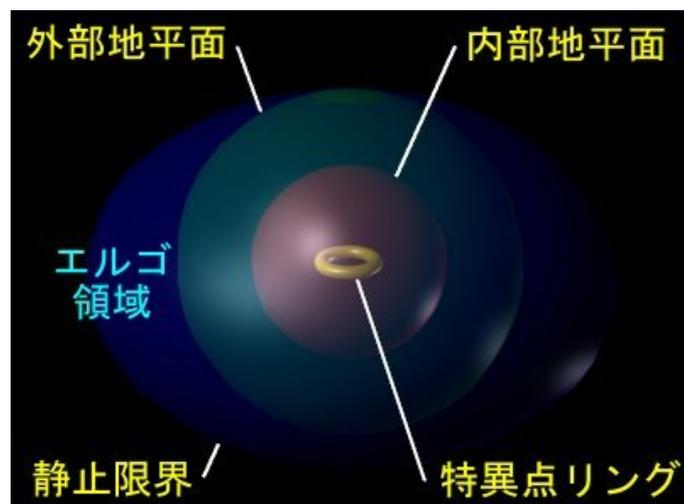
カー・ブラックホール解とは、一般相対論方程式の厳密解の一つで、真空中を定常的に回転する軸対称なブラックホールを表現している。ニュージーランドの数学者ロイ・カー (Roy Kerr) によって 1963 年に発見された。すぐ後に、さらに電荷を帯びた カー・ニューマン解も発見され、角運動量・質量・電荷の三つを持つブラックホール解として、その後、一般相対性理論の描く時空の姿の理解に広く使われている。

カー・ブラックホールでは、事象の地平面の外側には、回転の影響により、観測者が一点に留まれないエルゴ領域 (ergo region) と呼ばれる領域が形成される。

中心部の特異点は、リング状になっていると理解されている。



<http://albert51.tripod.com/bhole.htm>



http://quasar.cc.osaka-kyoiku.ac.jp/~fukue/POPULAR/99ce/bh/which/kerr_n.htm

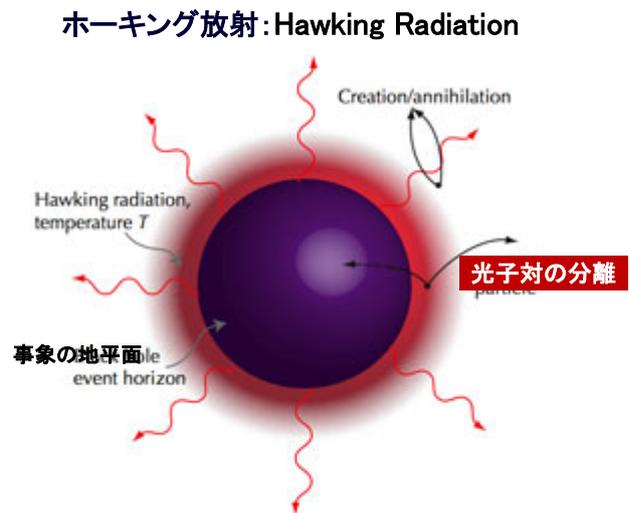
回転ブラックホールが現実的に考えられるものかもしれない。というのは、天体自体に回転していないものは聞いたことがない。いわゆる「降着円盤」というブラックホールのツバ広の帽子（ソングレロ）のようなディスクができるのは、自転しているからである。

④ ホーキング放射

1974年、英国はケンブリッジ大学のホーキング（Stephen W. Hawking）博士がブラックホールの「事象の地平面」に量子力学を適用したことで、量子力学と一般相対性理論の統合に向けて大きな一歩が踏み出された。

この結果、彼は「ブラックホールは蒸発する」と唱えて、物理学界に大きな波紋を投げかけた。喩えれば、バケツに水をたたえて何日も放置すれば、水面から水が静かに気化してなくなってしまうことが挙げられる。このブラックホールの蒸発現象は、「ホーキング放射」として広く伝えられたが、いまだに観測されていない。

その理論的シナリオについては、次のようなものが掲げられる。



<https://ttcblackholes.wordpress.com/hawking-radiation/>

<http://bonnokakurega.seesaa.net/article/18011375.html>

- 1) 事象の地平面はブラックホールの内と外とを分ける境界面で、その内側では重力が無限に強く、どんなものも外側へ出て来ることはできない。
事象の地平面の外側にいる観測者が受け取れるのは、ブラックホールに落ちていくヒトが事象の地平面を横切る前に発した光に限られる。
- 2) 光はブラックホール周囲の重力ポテンシャルの壁を登る間に引き伸ばされ、周波数が下がり、持続時間が長くなり、この結果、観測者には宇宙旅行者の動きはスローモーションとなるほか、通常よりも赤く見えるはず。この効果は重力による「赤方偏移」として知られている。
- 3) ここまでの説明では、光を古典物理学での電磁波として話を進めてきた。ホーキングが考えたのは、光の粒子としての性質を考慮に入れたときに、この「無限の赤方偏移」が何を意味するのかということ。
- 4) 量子力学によると、完全な真空も本当は「空っぽ」ではなく、ハイゼンベルクの不確定性原理の結果、《ゆらぎ》で満たされている。この《ゆらぎ》は仮想的な光子のペアという形をとる。ここでいう「仮想的」とよばれるものは、重力の影響下の平坦な時空では、これらの光子対が常に生成・消滅を繰り返し、観測することができない。

- 5) しかし、ブラックホール周辺の曲がった時空の中では、
光子対の片方が事象の地平面の内側に落ち込み、他方が外に残される
場合が考えられる。こうなると、光子対は仮想ではなく現実の存在に変わり、ブラックホールから外に向かう光の流れが生じて観測されるようになるほか、放射に応じてブラックホールの質量は減少。
- 6) この放射は燃え盛る石炭が発する熱放射と同じパターンとなり、これが、所謂、エネルギー分布が「プランク分布」と呼ぶパターンにあたり、その温度はブラックホールの質量に反比例。これが、「ホーキング放射」とよばれる現象。
ブラックホールが新たに物質やエネルギーを呑み込まない限り、ホーキング放射によってブラックホールは質量を徐々に失っていく。
- 7) ここで重要な点は、事象の地平面のすぐ近くの空間は依然としてほぼ完全な量子真空に近いということである。これは、後にブラックホールの流体モデルを考える上で重要となった。
- 8) 実際、ホーキング放射が生じるにはこの条件が欠かせない。仮想光子対はエネルギーの最も低い量子状態（基底状態）にある。このため、仮想光子が現実の存在になるには、ペアが分かれて、片方が事象の地平面の壁を登ってくる必要があります。

《ホーキングは間違っていたのか》

量子効果によって、ブラックホールの事象の地平面で仮想的な光子のペアが生まれる。一方の光子はブラックホール内に落ち、他方は重力ポテンシャルの壁を登って外へ進むが、放出された光子の波長は重力によって引き伸ばされる。

相対性理論によると、事象の地平面から放射された光子の波長は無限に引き伸ばされる。言い換えると、観測された光子は仮想光子として誕生したときには「波長が限りなくゼロに近かったはず。しかし、所謂、プランク長 (10^{-35} m) よりも小さな距離では未知の重力効果が支配的になるため、ホーキングの計算が正しいという保証はない。この難問に取り組む有効な方法は実験である。そこで、ブラックホールを模擬する実験可能なモデルが考えられた。これらのモデルに基づいて、ブラックホールが本当に放射を発するのか、そしてどのように放射が生じるのかについて研究されている。

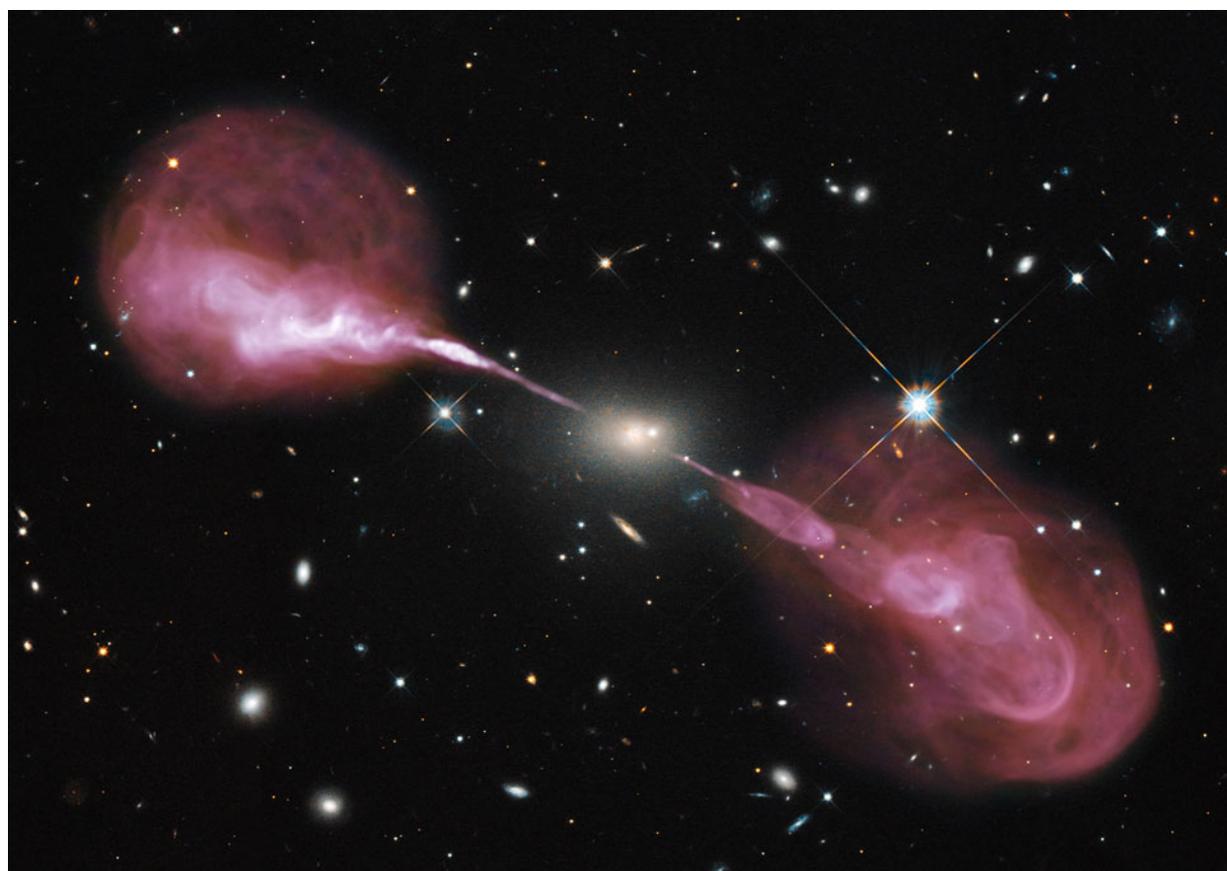
<http://bonnokakurega.seesaa.net/article/18011375.html>

⑤ ジェット噴射のシナリオ

楕円銀河：M87の画像で衝撃的なジェット噴射を見たが、さらに強烈な画像を次に掲げる。HSTの可視画像と、アレイ型電波望遠鏡：VLAの電波写真を重ね合わせたものである。ジェットは百万光年も広がっているから、天の川からアンドロメダ銀河までの半分ほどの距離まで伸びている。中心銀河は、天の川全体と天の川ブラックホールのそれぞれでだいたい千倍の質量をもつ3C348というマンモス楕円銀河であり、その中心のブラックホールから噴出しているらしい。21億光年先にあつて私たちには影響はないが、恐るべき現実のブラックホール・ジェットでもある。

電波銀河：ヘラクレス A(3C348)からのプラズマ・ジェット

Plasma Jets from Radio Galaxy Hercules A

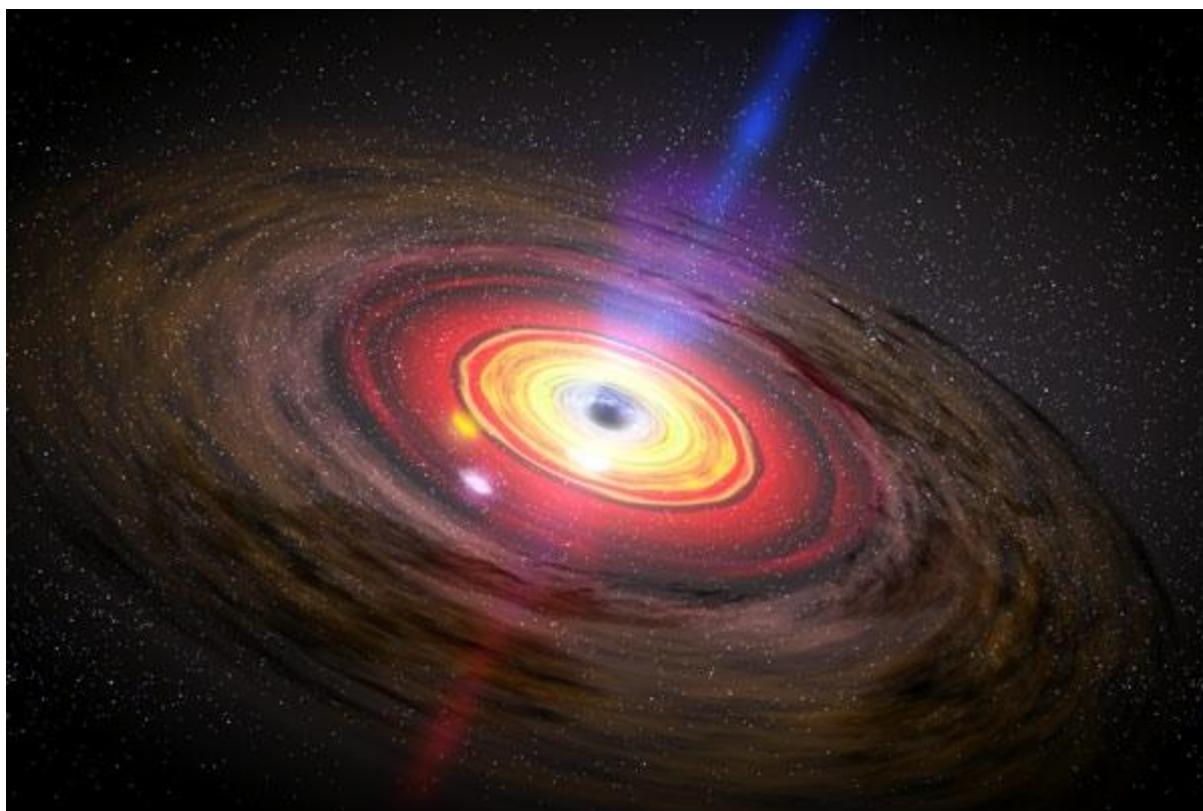


<https://apod.nasa.gov/apod/archivepix.html>

巨大ブラックホールからのジェット噴射機構は、現在研究中の最前線にあり、もっとも興味深い宇宙の話でもある。もともとは、そこに強大な重力を及ぼす天体ができれば、自然に降着円盤ができることから始まっている。これまで述べてきたように太陽系の創成期もそうであったし、渦巻銀河も中心部の周りに渦を巻く円盤である。

したがって、ブラックホールがあれば必然的にガスやチリが集まって降着円盤ができることになる。これがジェット噴射の物理的な原因になるらしい。

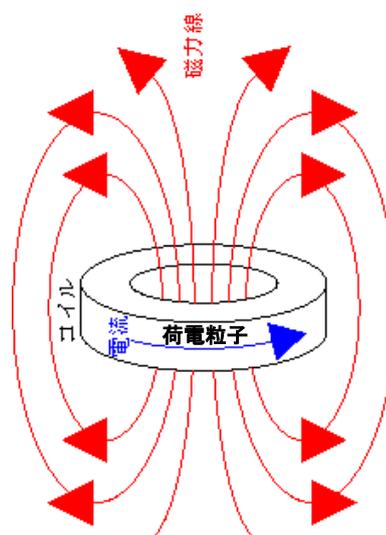
次に掲げる画像は NASA によるイラストであるが、ブラックホールの降着円盤の姿を見事に表している。真ん中から噴出しているジェットも本物のように見える。



https://www.nasa.gov/connect/chat/black_hole_chat.html

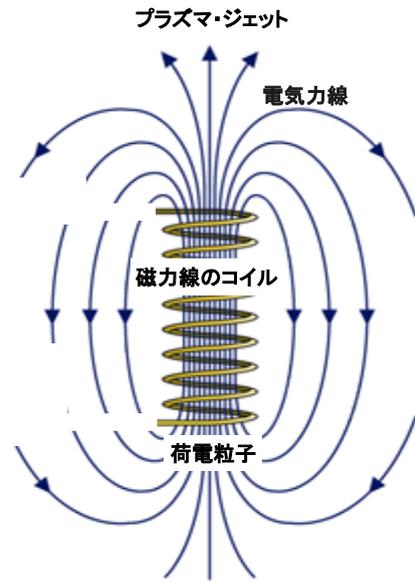
とても深い穴ができてそこに海水が流れ込めば、必ず鳴門の渦潮のようになることは容易に想像できる。つまり、ブラックホールに落ち込むということは、渦に巻かれながら吸い込まれるという感覚が正しい。周辺は混み合わないが、中心に迫れば迫るほど混み合っがガスどうしが擦れ合っって熱を発する。それで中心部が赤から高熱の黄色になる。

すると、たくさんのイオンすなわち荷電粒子が生まれて、いわゆるプラズマ状態になる。これが円盤に垂直に膨大な磁力線を生じる。



円盤の強烈な回転で磁力線も捩じられて巨大な磁気コイルが円盤垂直に生成される。すると、磁気コイルの中は電気力線が生じて荷電粒子の群れが勢いよく流れてプラズマ・ジェットとして噴出する、というシナリオが想定できる。あくまでも素人の考えであるが、一応、シンプルなジェット噴射の形態としては理論的にも例示されている。

なお、電磁場とは、必ず電場と磁場がセットになっている。ただし、磁場の双極子 N 極・S 極がモノポール：単極子でバラバラになっていたという宇宙初期の話はある。



結果的に、ブラックホールはあらゆるものを吸い込みながら、すぐ外側にジェット噴出メカニズムをつくってガスを宇宙空間にバラまいていることに留意しなければならない。ブラックホールは何でも食べてしまうのではないという感覚的理解が必要でもある。

[再掲イラスト： 巨大ブラックホール・ジェット／NASA]



ブラックホールの出来方

これまで、恒星の誕生と進化そして星死まで述べてきたが、「ブラックホールはどのようにして出来るのか」については余り触れて来なかった。まとめると、星の質量に拠って誕生するという説が有力で、次のとおりである。

太陽質量	最終天体	変容	説明
30 倍以上	ブラックホール	—	太陽の 30 倍もの質量がある星が一生を終えるときに超新星爆発して、重すぎる中性子核が出来て、さらに重力崩壊により押し潰されて出来るという。しかし、その生成過程と振舞いは、未だ、解明されていない。
30～8 倍	マグネター*	—	中性子星が、1 秒間に数十回という超高速で自転により、ガンマ線バーストを発生。観測は現在進行中。
	中性子星	II 型超新星爆発	巨星の最後に爆縮して中性子核を生成して、その反動で爆裂する。その残存核が中性子星である。この理論は、カミオカンデのニュートリノ観測(第 3 回参照)により裏付けられた。
3 倍以下	白色矮星	I a 型超新星爆発	白色矮星が巨星と二連星の場合、巨星からガスを吸い込む。結果、太陽質量の 1.4 倍(チャンドラセカール限界)を超えると爆轟して、何も残らない。
		彷徨	冷えて縮む。

(*) マグネター

超新星「SN 2011kl」は、爆発の際に生じた**ガンマ線バースト**が数時間も続いたという、たいへん珍しい超新星の第 1 号だ。一方、2015 年に発見された超新星「ASASSN-15lh」は、これまで見つかった超新星のうち最も明るく強力なもので、通常の超新星の明るさの 500 倍、天の川銀河全体の明るさの 20 倍に相当する輝きを 1 か月以上にわたって保ち続けた。

この 2 つの超高輝度超新星については、その強力なエネルギー源はマグネターであるという説が唱えられていた。マグネターは超新星爆発により生まれる中性子星の一種で、強力な磁場を持ち、1 秒間に数十回という超高速で自転する特殊な天体である。

銀河の分布

私たちの天の川銀河の周辺には、大・小マゼラン銀河などの矮小銀河がいくつかある。やがて天の川に吸収されるものもあるが、距離は数十万光年程度である。その先は以下に掲げるような階層で分別されている。

<https://www.kahaku.go.jp/exhibitions/vm/resource/tenmon/space/galaxy/galaxy07.html>

局部銀河群：

局部銀河群の半径は約 300 万光年。属する銀河の数は約 30 個。

私たちの銀河系のかたわらにはマゼラン銀河や、アンドロメダ銀河のそばの M32 などの伴銀河がある。

数十個ほどの銀河が直径数百万光年ほどの中に集まっているのを銀河群と呼ぶが、銀河系とアンドロメダ銀河はその周辺の銀河をふくめて一つの集まりを形作っており、局部銀河群とよばれる。

銀河団：

局部銀河群よりさらに大きな銀河の集まり。銀河団の大きさは千万光年程度で、属する銀河の数は数十個～数千個。

私たちにもっとも近い銀河団は、**おとめ座銀河団**で距離約 6 千万光年、1200 万光年ほどの広がりの中に、約 2500 個の銀河がふくまれている。

かみのけ座銀河団は距離 2 億 9 千万光年、直径 2000 万光年の中に約 1000 個の銀河をふくんでいる。こういう銀河団はこれまで 1 万個以上が見つかっている。

超銀河団：

銀河団や銀河群が連なって、1 億光年をこえるような大きな集まりを作っているとき、これを超銀河団とよんでいる。私たちの銀河系は、局部超銀河団（おとめ座超銀河団ともよぶ）に属している。局部超銀河団は、おとめ座銀河団を中心とした半径 6 千万光年ほどの薄い円盤状で、銀河系はその円盤の端の方に位置している。

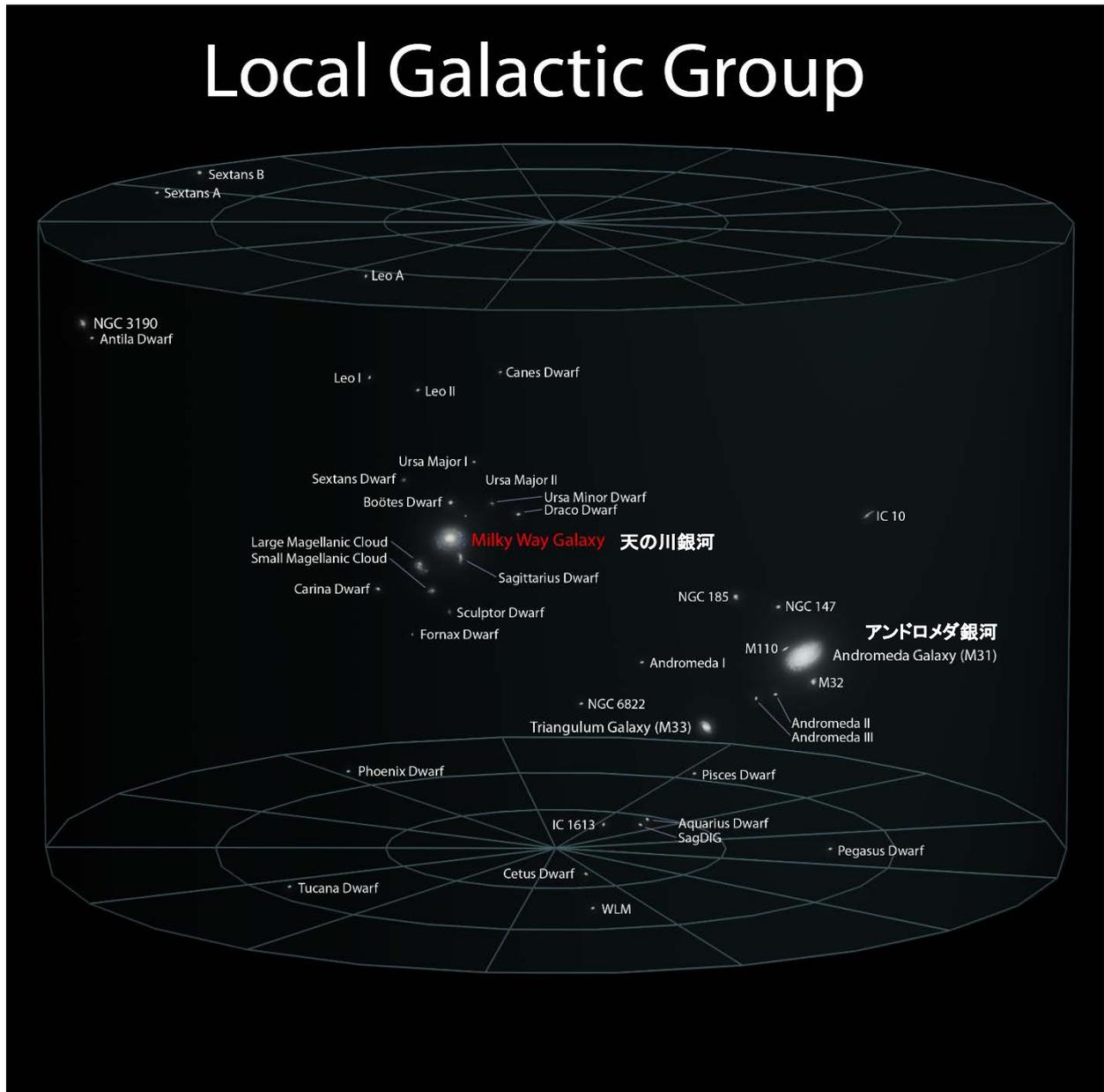
また、ペルセウスーお座超銀河団は距離 3 億光年、長さ 3 億光年の大きな集まりである。

1980 年代以降、観測技術の進歩によってより遠くの銀河が観測できるようになると、さらに大きな構造がわかってきた。数億光年から今では数十億光年もの範囲におよぶ銀河の分布が調べられ、線や面を形作るように超銀河団どうしがつらなっていること。また、これらのあいだには銀河がほとんど見られない領域、超空洞（**ボイド**）が広がっていることもわかった。

こういう分布を宇宙の大規模構造と言う。宇宙の歴史をくわしく知るためにも、この大規模構造の起源と進化をさぐる研究が必要なのである。

<https://www.kahaku.go.jp/exhibitions/vm/resource/tenmon/space/galaxy/galaxy07.html>

天の川銀河近くの局所銀河群の分布図

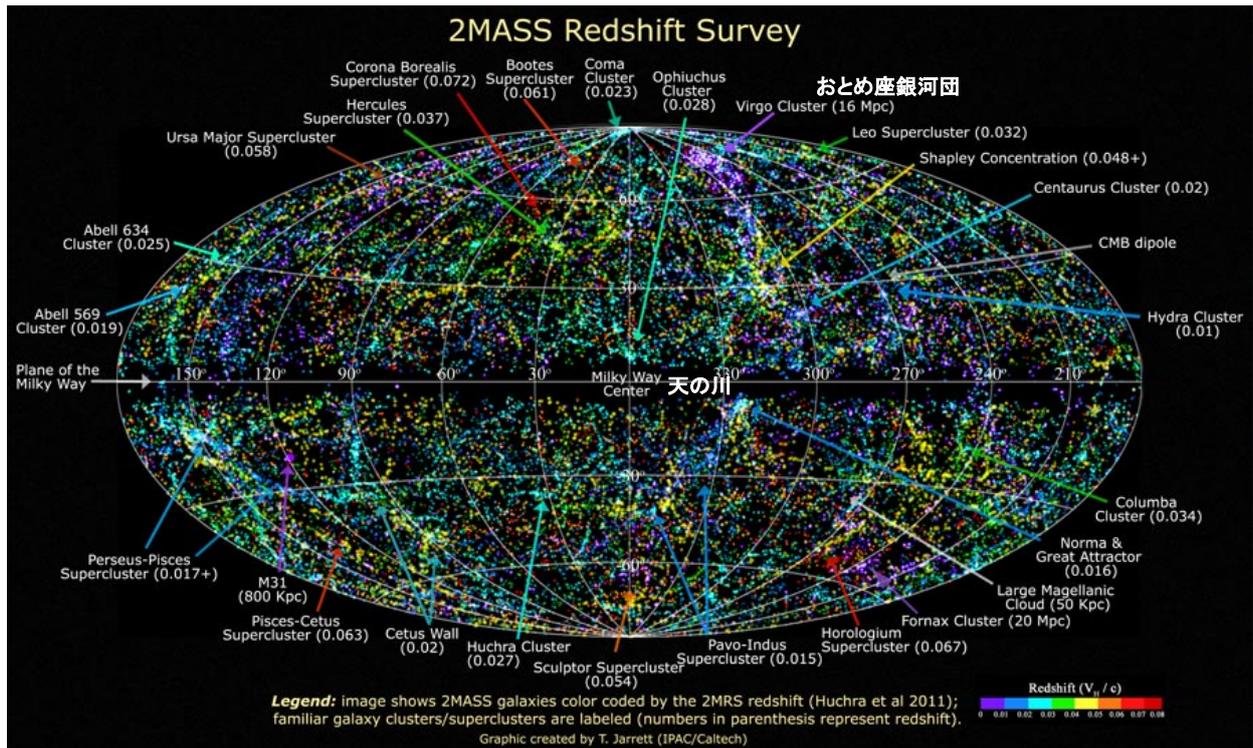


<http://burro.case.edu/Academics/Astr222/Galaxy/Environ/localgroup.html>

この広い宇宙には、数えきれないほどの銀河があるといわれている。それならば、無限数にあるのではないか、という疑問も19世紀に呈されたが。即座に、無限数にあるならば夜空はまぶしくて見られなくなる。一方、今の夜空の暗さは、有限の広さの中に有限数の銀河に留まっているから保たれているのだ。という見解で消え去った。

ちなみに、この広い宇宙の銀河の数は、5千億程度と言われている。
その一端に触れる画像を掲げて、本編を終える。

近隣の宇宙：The Universe Nearby 2011 June 14



<https://apod.nasa.gov/apod/archivepix.html>

[説明] 近隣の宇宙はどのように見えるのか？ 上のプロットは 2MASS 掃天探索 (Two Micron All Sky Survey)により赤外線観測された近隣の5万個の銀河を示している。結果としての画像は、宇宙が如何に形成され進化したかにかかる限界を供して、信じがたいほどのタペストリー (つづれ織り) 構造の一つである。画像の真ん中を横切っている暗い帯は、私たちの天の川銀河面のダストにさえぎられていることを示している。しかしながら銀河面から離れば、それぞれの点は銀河を表わし、点のカラーは距離に応じている。青い点は 2MASS 探索の中でも比較的近い銀河を示し、赤いほうの銀河はより遠い銀河を示す。つまり赤方偏移が 0.1 (約 14 億光年先) のところにある。名付けられた構造は、周辺に注釈を付けている。多くの銀河は、銀河団として重力で結束している。また、それぞれが超銀河団の中にゆるくまとめられており、もっと大きな構造で時には整列しているように見える。

エピソード

一言で銀河というのが、幾何学的な模様から始まり、とんでもないほど複雑怪奇なものまで遭遇した。まだまだその発掘は続いていくことは間違いない。何十億光年先の彼方をみることで、あらゆる観測技術を駆使して、既存にない技術でも蟻のようにせかせかと巣穴を造るようにより開発・応用して、天文学者は一心不乱に銀河の画像を掴んでいく。あげく人には見えないX線や赤外線まで捉えてしまって、自分たちでは解明出来ないのに、あとはまかすと言わんばかり。これまで見てきた銀河の写真を見る限り、私たちは居ながらにしてこの広い宇宙をくまなく探索できていることに満足したような気がする。でも、他の銀河系には、ほぼ永遠に辿り着けない距離がある。せいぜい太陽系の惑星やその衛星ぐらいが精一杯である。悲しいほど太陽系地球号という宇宙船は孤独であり、私たちはそこに群がる蟻みたいなものであることを実感してしまうことも否定できない。

現代は、夜空すら見ずに暮らしている人々も少なくない。そして、天国とか極楽浄土を私たちは天空に想像してしまうこともある。そんなもの何億光年先の銀河の姿をみたら、雲散霧消してしまうはずである。ただ、仏教でいう輪廻だけは不思議に宇宙の栄枯盛衰に合うかもしれないと思う。それでも人間原理の感覚であり、この広い宇宙ではほんの一部でしかない。例えば超新星爆発は物質の循環を担っている。私たちが感じられない宇宙感覚とか宇宙理念とかあって、その一端に触れていく楽しみもあろう。人間ではとどかないという学者もいる。具体的には、可視光線という視覚がある。ところが赤外線しかない惑星で進化した宇宙人は七色の赤橙黄緑青藍紫を見ることができないから、地球に来たらどうなるだろうか。「プレデター」という映画を観ればそれがわかる。

そして、次回に述べる宇宙創成にかかるビッグバンが一つの大きな典型として掲げられる。これは私たちが嫌う「一方通行」的な様相も呈している。間違っても逆走したら危険極まりない。つまり宇宙はやがて無くなるというシナリオである。時間も進むしかない。リサイクルしないのだ。私自身も本能的に拒否している。人は死んでも後世があり、生まれる前には前世があったことに拘っている。

このような絶望的な宇宙の末期まで踏み込んでしまうのが、ビッグバン予想である。しかしながら、その読みとき方には学者が掲げている事実や理論に対して正面から向かうことにより、新たな感覚が醸成されるかもしれない。それは神々さえも持てない好奇心である。ダークマターやブラックホールなど、まだまだ解明できていないことが山ほどある。ひょっとしたら、ブラックホールの向こうにホワイトホールがあってその間をワームホールがつないでいること、すなわち一般相対論の予言が発見されるかもしれない。そうすればホワイトホールの向こうに抜けて別の宇宙に行けるという空想も成り立ち、カール・セーガン原作に基づく映画「コンタクト」のようなことが夢でなくなるだろう。あり得ないと思うことが人間原理そのものであり、この広い宇宙はそんなことにかまってくれない。

それらに遭遇することが、次回のビッグバン予想になる。不安よりも好奇心が、居眠りよりも目から鱗がはがれることを求めて、コロンブスやハッブルの冒険も始まった。一方、私たちは居ながらにしてこの広い宇宙の行く末までも想像という宇宙船で冒険できるのだから、こんな楽なことはない。

別当 勉

<betobetoven@mail2.accsnet.ne.jp>

<参考図書等>

No.	題名	著者	発行元
1	銀河の世界	エドウィン・ハッブル(戎崎俊一:訳)	岩波書店
2	ハッブル 宇宙を拓けた男	家 正則	岩波ジュニア新書
3	ゼロからわかるブラックホール	大須賀 健	ブルーバックス
4	アインシュタインの宇宙	佐藤 勝彦	角川文庫
5	ブラックホールを見つけた男(上・下)	アーサー・ミラー(阪本芳久:訳)	草思社文庫
6	ホーキング 宇宙の始まりと終わり	スティーヴン・ホーキング(倉田真木:訳)	青志社
7	ホーキング 宇宙を語る	スティーヴン・ホーキング(林一:訳)	早川書房

<放送コンテンツ>

101	コスミック・フロント next 「天の川銀河の奇妙な姿」	NHK-BSプレミアム 2015.9.3	NHK
102	コスミック・フロント next 「エドウィン・ハッブル」	NHK-BSプレミアム 2016.11.24	NHK
103	コスミック・フロント next 「ダークマター」	NHK-BSプレミアム 2016.6.23	NHK
104	コスミック・フロント next 「巨大ブラックホール」	NHK-BSプレミアム 2016.6.16	NHK
105	宇宙とその進化 第8回「銀河の世界」	放送大学専門科目	放送大学

<インターネット・サイト>

201	https://astrobit.es.org/2016/12/27/how-one-person-discovered-the-majority-of-the-universe-the-work-of-vera-rubin/ How one person discovered the majority of the universe – The work of Vera Rubin		
202	http://www.physicscentral.com/explore/people/ghez.cfm Andrea Ghez		