



シネマ天文楽【12】

## 銀河文明への道

福江 純（大阪教育大学）

## 1. 宇宙人はどこにいる！？

この広い宇宙には、われわれ地球人以外にも生物さらには知的生物（宇宙人）が存在しているのだろうか。それとも、この広い宇宙に生命が存在しているのは地球だけなのだろうか。核物理学者のエンリコ・フェルミが1950年、「宇宙人がおるんやて！？ ほなら、そいつらはいったいどこにおんねん！！」と、おそらくイタリア語訛りの英語で問うた。そこで今日、宇宙人はいったいどこにいるのかという、これまで繰り返し問われてきた問いは「フェルミパラドックス」と呼ばれている。

宇宙人が存在するか否か、宇宙人までいなくても、宇宙生命が存在するか否かは、宇宙の起源や地球生命の起源などと並び、天文学の究極命題の一つである。天文学にはさまざまな研究対象があり、それぞれでいろいろな成果が上がっているが、その中でも、とりわけ火星探査や系外惑星の探査があれだけ話題になるのも、そこに地球以外における生命の存在がからんでいるからこそである。

微生物形態の生命や過去の生命の痕跡なども含めて、宇宙に存在するかもしれない生命について調べる分野を「生命天文学、宇宙生物学（bioastronomy）」と呼んでいる（類似の用語には「異星生物学（exobiology）」とか「異生物学（xenobiology）」という呼び方もある）。天文学はもともと、物理学から化学・生物学・地学にいたるまで、さまざまな科学の知識を必要とされる総合的な学問分野なのだが、その天文学の中でも、宇宙人に関して研究する分野はとりわけ総合科学的な色彩が強い。人類が蓄積してきたあらゆる科学知識が試される分野といってもよい。つまり、

- ・ そもそも生命とは何か
  - ・ 炭素質ベースの地球型生命以外にも、珪素質ベースなどの生命体は可能なのか
  - ・ 地球型の惑星はどのように形成され、いくつぐらい存在するのか
  - ・ 地球型惑星の上で、生命はどのように発生し進化するのか
  - ・ 他の惑星で発生し進化した知的生命は、どのような精神構造を取るのか
  - ・ それらの知的生命は、どのような社会構造を発達させるのか
  - ・ どのように技術文明は発達し、さらには高度な技術文明の形態はどうなるのか
- などなど、天文学的、化学的、生物学的、工学的、社会学的、心理学的、にさまざまな検討を必要とするのである。

さて、本稿では、高度未来文明という観点から検討してみよう[1][8]。

## 2. 『スタートレック』

宇宙人は宇宙を舞台にした SF 映画では欠かせない存在だ。当然ながら、宇宙人の出てくる映画には、実にさまざまな傑作・名作・佳作・凡作・駄作がある。が、宇宙 SF 映画のスタンダードという点と、未来の科学技術や高度宇宙文明という観点も鑑みると、ここで取り上げるのは、やはり『スタートレック』以外にないだろう。

ぼくと同じくらの年代の人だと、“宇宙…そこは人類に残された最後の開拓地である…”というナレーションを覚えている人もいだろう。スタートレックの<オリジナル・シリーズ>は、カーク船長、副船長ミスター・スポック、機関長スコット、航宙士チェコフ、

操舵士スールー、通信士ウーラ、そして船医ドクターマッコイらを中心クルーとする地球連邦の宇宙船 USS エンタープライズ号が、5年間にわたる驚異に満ちた探査行を描いた物語である（図 1）。オリジナルシリーズは、制作者ジーン・ロッデンベリーの壮大なビジョンのもとに、1960年代、TVシリーズとして1966年から放映された（日本では1969年から放映）。最近（2004年）、完全予約限定生産で、DVD 大全集も発売された。

図 1 『スタートレック』オリジナルシリーズ  
（<http://216.39.185.4/StarTrek/TOSintro.htm> と  
[http://www.scifi3k.com/star\\_trek.html](http://www.scifi3k.com/star_trek.html)）  
上が懐かしのクルー、下はバルカン星人のミスター・スポック。

オリジナルシリーズの放映が終了した後も

人気は衰えるばかりか上昇していき、映画化もされて、劇場版 1 作目『スタートレック』（1979年）以降、6作ほど作られた。さらにオリジナルシリーズの枠を超えてスタートレックの世界は広がりを見せ、新世代のクルーが活躍する〈ネクスト・ジェネレーション・シリーズ〉（1986年）、〈ディープ・スペース・ナイン〉、〈ボイジャー〉など、いくつものシリーズが製作されてきている（図 2）。それらも劇場版 7 作目『ジェネレーションズ』（1994年）他、映画化されている。

ちなみに、スペースシャトルの試作機エンタープライズ号が、熱心なスタートレックファン（トレッキーと呼ぶ）の活動によって、USS エンタープライズ号にあやかって命名されたのは有名な話である。

図 2 『スタートレック』の色々なシリーズ  
（<http://www.emerson06.hpg.ig.com.br/parte%20wallpapers.htm>）

スタートレックの世界はあまりに膨大なので、どれか一つの作品を取り上げるのは諦めた。参考文献[2][3][4][5]などを参照して欲しい。

さて、スタートレックには、万能診断装置トリコーダーや腕時計型 TV 通信機（これはもう実現してしまった）、転送装置やフェザー砲、光子魚雷、ワープ機関、などなど、小か

ら大までさまざまな未来ガジェットが出てくる(図3)。また、地球連邦、クリンゴン帝国、ロムランなど、いろいろな銀河文明も登場する。転送装置やワープ機関の科学にも興味津々だが、以下では高度に進歩した宇宙文明について考察してみよう。銀河帝国は生まれるのだろうか。

つだろう。

かつて旧ソ連のニコライ・カルダシェフは、技術的に発達した高度な宇宙文明を、そのエネルギー消費の規模によって、3つに類別した[6](表1)。

表1 高度宇宙文明の形態1

文明の型	利用するエネルギーの規模
タイプ I	惑星規模のエネルギー
タイプ II	恒星規模のエネルギー
タイプ III	銀河規模のエネルギー

惑星規模のエネルギーを利用する文明がタイプ I で、およそ  $4 \times 10^{12}$  ワットのエネルギーを消費する。現在の地球文明がほぼこのレベルである。また、恒星規模のエネルギーを利用する文明がタイプ II で、およそ  $4 \times 10^{26}$  ワットのエネルギーを消費する(太陽の光度は  $3.85 \times 10^{26}$  ワット)。後述するダイソン殻文明がこのレベル。さらに、一千億個の恒星からなる銀河規模のエネルギーを利用する文明がタイプ III で、およそ  $2.4 \times 10^{37}$  ワットのエネルギーを消費する。タイプ II の約一千億倍のエネルギー規模である。

興味深いのは、現在のエネルギー消費の成長率より低目にとった年 1% の成長率でも、もし指数関数的な成長をすれば、現在のタイプ I 規模からタイプ II まで 3200 年、タイプ III まで 5800 年! しか、かかれないと見積もられることだ。もちろん実際には空間的(距離的)制約などもあるが、予想外の短さである。さらに環境問題などはあまり考えられていなかった時代の見積もりだが、恒星規模や銀河規模の文明になると、宇宙環境への汚染の問題も出てくるかもしれない。なお、原論文では、それらの文明が送信できる情報量について見積ってあるが(むしろそっちが主題)

図3 スタートレックで出てくる宇宙船の例 (<http://www.ex-astris-scientia.org/scans/constitution1.htm> と <http://www.arcata.it/wallpaper/fantascienza.htm>) USS エンタープライズ号(上)とボーグのキューブ型宇宙船(下)。

### 3. 高度宇宙文明

現在の地球文明と比べ、技術的にはるかに進歩した文明を、しばしば「高度宇宙文明」と呼んでいる。地球人以外の宇宙人が高度宇宙文明を築きあげている可能性もありえるし、数千年後の地球人が築き上げている地球文明の姿かもしれない。いずれにせよ、高度宇宙文明は、(地球人も含め)地球型惑星に発生した人間型宇宙人の技術文明の行きつく先の一

ここでは省略する。

さて、カルダシェフは、(エネルギーの種類には関係なく) 文明全体が使用するエネルギーの量的側面に注目して、高度文明を分類している。一方、それに対して、利用するエネルギーの種類すなわち質的側面によって文明を分類することが考えられるだろう。もし質的な立場から高度宇宙文明を類別してみると以下のようになるだろうか[1] (表 2)。

表 2 高度宇宙文明の形態 2

文明の等級	利用するエネルギーの種類
グレードC	化学エネルギー
グレードN	原子核エネルギー
グレードG	重力エネルギー
グレードA	反物質エネルギー
グレードX	真空エネルギー

化石燃料など、化学エネルギーを利用する文明の段階をグレードC (chemical) と呼ぼう。原子や分子のエネルギー、電磁相互作用のエネルギーと言い換えてもよいだろう。ただし、化学反応によって解放されるエネルギーは、物質の静止質量エネルギーの数百億分の1程度なので、エネルギー利用の効率は非常に悪い。宇宙文明において、少なくとも人類は、最初に“火”、すなわち化学反応のエネルギーを利用したし、現在も基本的にはその延長上にある。

核分裂や核融合など、原子核のエネルギーを利用する文明の段階がグレードN (nuclear) である。(原子) 核力のエネルギー、弱い相互作用のエネルギーと言い換えてもよい。原子核エネルギーの場合、たとえば、4個の水素が1個のヘリウムになる核融合反応では、核子1個当たり約0.007の割合で質量欠損が生じエネルギーに転化するの、水

素核融合反応の効率は、0.007である。現在人類は核分裂という初歩的な形ではあるが、原子核のエネルギーを少し利用し始めている。やがては恒星内部のような核融合のエネルギーも手なづけ、太陽圏を征服していくことになるだろう。すなわち、やがて人類は軌道上へ進出してゆきスペースコロニーを建設するだろう。この最初の黄金時代が火星東キャナル市の砂塵に終わらなければ、他の恒星を巡る地球型惑星へ植民し、あるいは非地球型の惑星を人類に適した惑星に改造してゆくだろう。さらには後述するダイソン球/リングワールドを建設し恒星のエネルギーをも利用する段階、カルダシェフのII型文明段階に到達するかも知れない。これらは全て恒星のエネルギーを直接間接に利用するもので、ここでの分け方に従えばグレードNの文明ということになる。

このようにエネルギーの変換効率、すなわちエネルギーの質という面から高度文明をランクづけていくと、次の飛躍は重力エネルギーを利用する段階—グレードG (gravity) だろう。もちろんわれわれも非常に原始的ではあるが、たとえば水力発電によって重力エネルギーを利用しやすい電気エネルギーに変換している。しかし、その効率は化学反応より低い。ここでいうグレードGとは、その極限まで重力エネルギーを有効に変換できるようになった段階をさす。すなわち、中性子星やブラックホールの重力落差を利用すれば、物質の静止質量エネルギーの約6%から最大で約42%まで、エネルギーを取り出すことができるのだ。重力エネルギーの効率は、核融合に比べて10倍から60倍もいいのである。

重力エネルギーを利用するグレードGを上回る段階としては、物質と反物質の対消滅反応を利用するグレードA (antimatter) や、真空エネルギーなど未知のエネルギー源を利用するグレードXなどが考えられる。反物質

の場合は効率は 100%になるし、真空エネルギーにいたっては、無から有が生じるようなモノだから、効率は定義できない。

#### 4. ダイソン球文明

地球に降り注ぐ太陽光の割合は、太陽から放射される全エネルギーのうち、地球の断面積を地球軌道の半径（1 天文単位）の球の面積で割った分だけであって、全放射の約 20 億分の 1 に過ぎない。太陽エネルギーの残りの大部分は暗黒の宇宙空間に捨てられているわけだが、これは大変もったいない。そこでもし、地球軌道の半径をもつ球殻で太陽をすっぽり覆うことができれば、太陽エネルギーを漏れなく利用することができるだろう。もちろん、自然にそんな球殻ができることはないだろうが、非常に進歩した文明なら、そのような球殻を人工的に構築できるかもしれない。球殻の内側の表面積は地表面積の 10 億倍もあるので、そんな球殻ができれば人口問題もエネルギー問題も一挙に解決するだろう。

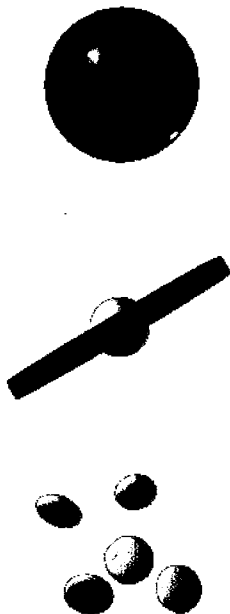


図 4 ダイソン球とバリエーション

以上のように考えた物理学者のフリーマン・ダイソンは、1960 年、『サイエンス』誌でそのような構造体を提案した[7]。今日、そのような人工構造体を「ダイソン殻」とか「ダイソン球」と呼んでいる（図 4）。

ダイソン球のオリジナルイメージは、名前の通り球殻状の構造体だが、ダイソン球は必ずしも球殻状である必要はない。たとえば、赤道面で太陽を取り巻くベルト状の構造体でもよい（図 4 中）。あるいは軌道運動する無数のプラットフォームでもいい（図 4 下）。

ところで、かりにダイソン球で太陽光を漏れなく受け止めることができたとしても、太陽エネルギーを 100%使い尽くせるわけではない。エネルギーの変換効率という物理的な壁があって、必ず廃熱が生じるからだ。その廃熱は、赤外線という形で宇宙空間へ捨てなければならない。その結果、ダイソン球は赤外線を放射する赤外線源として観測されるだろう。ダイソンはそこまで議論しているが、現在までのところ、多数の赤外線源の中でダイソン球と認定されたものはない。

#### 5. 降着円盤文明

熱機関という観点からすると、熱源は高温な方がいい。では、星（太陽）よりも高温の熱源が宇宙にあるかという、これがあるのだ。降着円盤である。中性子星やブラックホールのまわりに形成された降着円盤では、中心近傍の温度は一千万度にも達する。熱源として降着円盤を利用する文明についても、少し紹介しておこう[8]。

##### 5.1. 降着円盤とは

原始星・白色矮星・中性子星・ブラックホールさらに超巨大ブラックホールなど、重力をおよぼす天体に周囲から降り積もってきたガスによって、中心天体の周囲に形成されたガスの円盤を「降着円盤」と呼んでいる。

降着円盤は、原始惑星系・激変星・X線星・活動銀河など、宇宙における活動的な天体において、その活動の中心的な役割を担っている。そして降着円盤は、しばしば活動天体の強烈なスペクトルや活動天体から噴出するジェットの原因になっている。



図5 ブラックホールのまわりの降着円盤

降着円盤は、一般に電離した水素ガスからできていて、名前の通り円盤状で不透明であり、直感的には平たい星だと考えることができる。ガスは降着円盤の中を、太陽系の惑星のように、中心ほど速い回転角速度で回っている。降着円盤の中では、ガス同士が互いに接しているため、隣接するガス層の間で摩擦が働く。その結果、ガス同士が擦れあって、ガスは激しく加熱される。さらに、高温になったガスはついには光を放射して輝き始める。この降着円盤からの強烈な電磁放射が活動銀河などの明るさの根源だ。このエネルギーは、中心のブラックホールなどに対して、ガスが持っていた位置エネルギー(重力エネルギー)である。本来は非常に暗いはずのブラックホールや中性子星が、そのまわりの降着円盤の存在で非常に明るい天体に変身し、観測可能になる。

このような降着円盤は、物質の重力エネルギーを効率よく解放する自然のメカニズムで、しかも宇宙の中はかなり普遍的に存在する天体である。必要なのは、中心となる“星”、ガスを供給する環境、そしてそれらの間の相対的な角運動量だけだ。これをほっとく手はない。恒星自体をエネルギー源とし、さらに星

間航法を開発した宇宙文明は、おそらく新たなエネルギー源として降着円盤にも目を付けるだろう。降着円盤をもつ系(たとえば近接連星系)に、前進基地や小規模の植民地を設けるなどして足場を築きつつ、宇宙植民を進めていくかも知れない。そのような段階において、文明はどのようにして降着円盤を利用するだろうか。

## 5.2. 降着円盤のエネルギー的利点

まず、恒星と比較した時、降着円盤の特筆すべき点を幾つか挙げておく。

(1) 恒星と比べて決定的に異なる点の1つは、その幾何学的構造にある。すなわち恒星はほぼ球対称だが、降着円盤はその名の示すとおり扁平な天体なのだ。また恒星は通常表面温度もその表面で一定と考えてよいので、エネルギーを変換するシステム(便宜上ダイソン構造体と呼んでおく)の受け取るエネルギーは、星からの距離のみに依存する。一方の降着円盤では、円盤面上の場所(中心からの距離)によって異なる温度の黒体放射を放射している(中心ほど温度が高い)。したがって、ダイソン構造体の置かれる場所、姿勢によって受け取るエネルギーは大きく異なり、ダイソン球のように構造体を球殻状に配置し、中心の天体からの熱を受けて廃熱を外殻に捨てる、という単純な描像はもはや成り立たない。

(2) 降着円盤は高熱源体である。降着円盤の表面温度は、中心の天体の質量、ガスの供給率、円盤上の場所などによって異なるが、(周辺領域での)1万度から(中心領域での)数千万度にも達する。早期型主系列星の表面温度がせいぜい数万度であることを考えると、降着円盤はきわめて“高温”なのだ。そのため周辺には居住可能領域(ハビタブルゾーン)はないか、あったとしても非常に限定されるだろう。したがって、降着円盤系に植民する

にはかなりの工夫がいるだろう。むしろエネルギー変換ステーションや中継基地だけを置くのが、現実的かも知れない。一方、高熱源であることから、最初にも触れたように熱機関の効率は良くなると思われる。

(3)重力。恒星の場合、その表面近くではポテンシャルの井戸が急激に深くなり、脱出速度は距離の平方根に反比例して増大する。しかし降着円盤の場合は異なる。中心の天体からの重力はもちろん働いているが、降着円盤を構成しているガスの量は通常それほど多くなく、しかも広い範囲に分布しているので、降着円盤自体からの重力は小さい。従って、中心近傍でない限り、降着円盤に近づきあるいは離脱するのは、エネルギー的にはたやすい。このことから適当な構造体を降着円盤の内部に設置することも可能だろう。

### 5.3. 重力発電所の形態

さて、以上のような降着円盤の特徴を考慮しつつも、降着円盤系からエネルギーを抽出するのは、基本的にはダイソン球のバリエーションでよいと思われる。すなわち、降着円盤の輻射エネルギーを“太陽電池”によって利用しやすいエネルギー形態に変換し、低温の廃熱を宇宙空間に捨てる方法だ。ダイソン球のエネルギー源が恒星の核融合エネルギーであるのに対し、降着円盤では、角運動量と粘性という自然に備わった機構によって解放された降着ガスの重力エネルギーがそのエネルギー源であるのが異なるが。降着円盤本来の働きによって、輻射に変換された重力エネルギーを捕獲するために、ありふれたものではあるが、次の2つの配置を考えてみよう。

#### (1) <軌道ダム形式>

単純には、降着円盤内部にダイソン構造体を設置し、軌道運動させればよい。中心の天体の重力と、構造体の軌道運動による遠心力が釣り合う状態にする。降着円盤にリングワ

ールドを埋め込んだものを想像すればいいかも知れない。

軌道ダム形式の利点／特長としては、以下のようなものがある。①中心にしか熱源のない恒星周辺のダイソン球と異なり、降着円盤全面が熱源なので、ダイソン構造体を何重にも配置できる。②しかも構造体の片面（中心方向）からだけでなく、両面からエネルギーを吸収することができる。③降着円盤からの輻射エネルギーを利用することはもちろん、システムを円盤内に置くことによって、円盤を構成しているプラズマ（ほとんどは電離水素ガス）を直接処理できる。たとえば、効率は悪いが、ヘリウムへ転換して核融合のエネルギーを取り出したり、また潮位差発電のような方法で、輻射エネルギーに変換する以前に、ガスの重力エネルギーを取り出すことも可能だろう。さらに電離ガスが電気の良い良導体であることを利用したMHD（電磁流体力学的）発電なども考えられるだろう。

一方、軌道ダム形式の問題点もある。①円盤のプラズマガスは、いくら希薄とはいえ、かなり高温である。その高熱から構造体を防護するシステムが必要。核融合炉の問題と同じで、電磁気的なシールドが適当だろう。②また紫外からX線が中心となる高エネルギー輻射を、効率よく捕捉する“太陽電池”が必要である。③一方、これら高温プラズマ、高エネルギー輻射などから構造体を（たとえば磁場によって）防護できたとしても、防護する過程そのものやエネルギーを吸収する段階において、それらと相互作用せざるを得ない。その結果、構造体は角運動量を失い、（ほっておけば）周囲のプラズマと同様に、徐々に中心へ落下してゆくだろう。軌道を維持する何らかの機構が必要である。④最後に両面からエネルギーを吸収できるという特長は、裏を返せば、どこに廃熱を捨てるかという問題が生ずる。構造体の両脇すなわち円盤面に垂直

方向に捨てざるを得ないだろう。

(2) <浮遊プラットフォーム形式>

降着円盤の上下に、円盤全体（少なくともエネルギーの発生量の大きい中心近傍）を取り囲むようにして、ダイソン構造体を配置したのが浮遊プラットフォームだ（図6）。

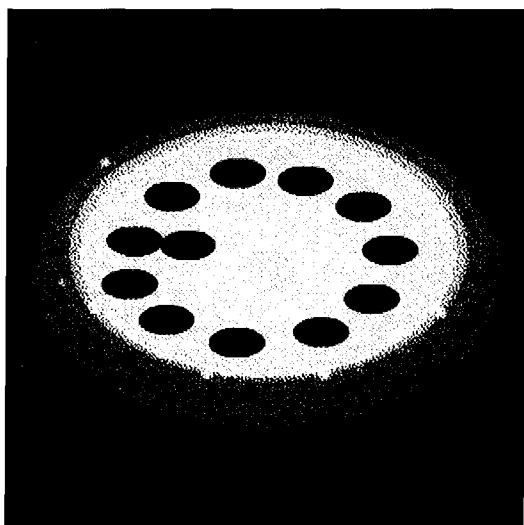


図6 降着円盤上の浮遊プラットフォーム

浮遊プラットフォームの利点／特長は、①原理的には発生するエネルギーを漏れなく回収できる。②円盤内の高温プラズマと構造体が、直接に接触しなくてもよい。③廃熱の処理が容易である。などである。

一方、問題点もある。①オリジナルなダイソン球でも同じ問題があるかも知れないが、円盤全体を取り囲むと、構造体を互いに衝突しないように軌道運動させることが困難になるだろう。したがって回転によって中心の天体の重力を相殺することができなくなりそうだ。1つの案は、降着円盤自体から来る強烈な輻射の圧力によって構造体を支える可能性である。以前、数値的な検討をしたことがあるが、そのようなプラットフォームはフォトンフローターと呼んでいる[8]。

## 6. 銀河文明の伝播

恒星間空間に進出した宇宙文明は、(地球人のような考え方をするなら)ヨーロッパが地球全体を植民地化していった大航海時代のように、移民宇宙船を仕立てて銀河系全体を植民していくかもしれない。これを「銀河植民化」という。

銀河系全体を植民するにはどれくらい時間がかかるかということ、超光速航法やワープなどを考えなくても、実は驚くほど短時間で全銀河系を植民できる。一つの試算をしてみよう。

隣の星までの距離（恒星間の平均距離）を10光年、移民宇宙船の速度を光速の1割とする。このとき、母星を出発して隣の星まで到達するのに100年かかる。近隣の星々に入植を開始してから第2次植民まで、人口を増加し力を蓄えるのに400年かかるとする。とすると、植民化を一つ進めるのに、トータルで $100+400=500$ 年かかることになる。言い換えれば、植民の波は、500年で10光年広がる。すなわち、植民の波の速度は、 $10\text{光年}/500\text{年}=0.02\text{光年}/\text{年}$ となる。銀河系の広がりには10万光年なので、この速度で銀河系全体に植民の波が広がるには、 $10\text{万光年}/(0.02\text{光年}/\text{年})=500\text{万年}$ ；たった500万年しかかからないのだ。仮に植民化のステップが一桁長くて5000年だとしても、全銀河系の植民化には、5000万年しかかからない。

500万年にせよ5000万年にせよ、銀河系の年齢（約100億年）に比べれば、あっという間である。

ここでふたたび最初の設問“宇宙人はどこにいる？”に立ち戻ることになるわけだ。すなわち、銀河植民の波がこんなに短時間で伝わるにもかかわらず、いまだに宇宙人との出会いがないのは何故だろう。原因としては、

地球人以外の宇宙人はいない

宇宙文明の平均寿命が非常に短い



---

---

地球近傍が保護区になっている

その他

などが考えられるが、いまだにわかっていない。

銀河文明に関する考察は、まだまだこれからの研究分野であり、銀河文明への道はまだまだ長いのだ。

「シネマ天文楽」は今回をもって終了します。

参考文献

- [1] 福江純『降着円盤への招待』講談社 (1986年)
- [2] 永田よしのり編『カルト映画館 SF』社会思想社 (1996年)
- [3] 黒住光他『SF 宇宙映画の逆襲』アスペクト (1999年)
- [4] 北島明弘『何回でもみたくなる SF 映画選集』講談社 (2000年)
- [5] ジェームズ・ヴァン・ハイス他『スタートレック大研究』ジャパン・ミックス (1995年)
- [6] Kardashev, N.S." Soviet Astronomy AJ", Vol. 8, No. 2, 217. (1964)
- [7] Dyson, F.J." Science", 131, 1667. (1960)
- [8] 福江純『SF 天文学入門 (下)』裳華房 (1997年)



福江 純

fukue@cc.osaka-kyoiku.ac.jp