

## この広い宇宙いっぱい VI

### 「宇宙に方程式を捧げた男：アインシュタイン」

2017年9月23日 2017年12月18日改 別当勉

#### プロローグ

そのむかし「猿の惑星」という映画（1968年）があった。ピエール・ブール原作による同名のSF小説に基づくものである。これは、太陽系外惑星の探査に出かけた宇宙船が何光年も旅して、皮肉にも地球に戻ってしまったという設定である。おそらく数百年もの宇宙飛行が必要となるのだが、光速の数分の一ほどの速さで飛行したから、船内の時間は地球に比べて非常に遅くなるのであろう。その間、ほぼ止まっているほどの太陽周回軌道の地球では、数百年の時が過ぎていた。また、自動航行の宇宙船は宇宙空間の重力歪みによって、あっちこっちと曲げられて、元に戻ってしまったのである。車の運転で、よく知らない裏道を回って方角を失い、ぐるぐる廻されていつのまにか元の道にもどってしまったという経験が、誰しもあるに違いない。それとは物理的現象としては異なるが、感覚的に似ている。

数光年の旅をした宇宙船のクルー達は、見知らぬ地球型の系外惑星に不時着したと思込んでいる。ところが、そこは進化して知能を付けた猿に支配されていた。人間は猿の奴隷である。そして様々なドラマが展開される。やがては、『自由の女神』が土砂をかぶって横たわっている場所に辿り着き、ようやく、この惑星が地球だったのだと気づき、核戦争でニューヨークが廃墟となったことを知って、スペース・クルー達は愕然とする。

日本では「浦島太郎」が昔話として有名であり、時の過ぎゆく場所感覚の違いが鮮やかに語られてきた。この話に相対性理論は影も形もない。

「猿の惑星」では、アインシュタインの特殊相対論と一般相対論による予言が見事に応用されている。でも、私がそれを知るには幾年月もかかってしまった。そして、いま、ようやくアインシュタインの思考と解析の道程を書いてみる知識と意欲が蓄えられたのである。

彼の名はアルベルト・アインシュタインというが、ここでは“アルベルト”と呼びたい。英語では“アルバート・アインスタイン”と発音する。欧米の氏名には国によって似通っているものがたくさんある。例えば、ジョージはゲオルグ（独）、ロバートはロベルト（伊）、ピーターはピョートル（露）、ウィリアムはヴィルヘルム（独）、チャールズはシャルル（仏）とか、挙げたらきりが無いが、欧米の歴史本を読むときには留意すると文化の流通に気付いて余計に面白くなる。ときたま、手抜き日本人作家の間違った使い方が見つかることも少なくない。

とにかく、アルベルトはこの広い宇宙に「方程式」を献上した唯一無二の科学者であり、未だに、もう百年も経つのに彼を凌ぐ物理学者は現れていない。そんな人並外れた男の思考と、宇宙方程式を組み上げていく過程をたどってみよう。

## 光速度不変

光に速さがあるなんて考えられないのが私たちのまともな感覚でもある。光が瞬時に無限遠に届くと思っても、私たちの日常生活では都合が悪いことはない。音速も、家屋内や運動場では、その遅さに気付かないが、遠くで花火を見るとき、そのドンという音が花火のきらめきよりも2～3秒遅れて聞こえる。雷もピカッと光ってから数秒後にゴロゴロと聞こえると、遠くで雷が発生していることが判り、少し安心する。これらの経験から、誰でも音には速度があると認識できる。音速は、1気圧の空気中ではだいたい秒速300m程度であるから、雷音が3秒遅れると凡そ1kmも離れていることになる。

だが、19世紀に生まれたアルベルトにとっては、誰も気にしない光の速度とその特徴について気になって仕方なかったようである。そして、彼の脳裏には光速度の測定や、エーテルの存在を突き止める実験など、当時の光の物理的情報が刻まれて蓄えられていった。音波の伝搬は見えない空気存在によりなされることから、哲学者や科学者は、宇宙空間が透明なエーテルで満たされていると怪しく唱えていた。元々は、第1回で述べたようにギリシャ時代の哲学者アリストテレスが言い出したもので、根も葉もないことから16世紀のコペルニクス以降には殆ど消えてしまった。というよりも誰も気に掛けなかったが、哲学者で数学者のデカルト(1596～1650年)が17世紀に再燃させ、光の伝搬はその幻の透明なエーテルによるものとした。このため、エーテルの存在が信じられるようになったのだ。つまり、磁石の作用は、離れた空間をとおして磁力線が出てS極とN極がお互いに引き合ったり、同極どうしは反発することで説明がついた。電気の+と-が電気力線を介して同様に作用する。ところが、光や重力は力線が無い。何も無い空間を通して光が伝わり、重力も相互に作用する。「何も無い」空間の不思議さである。常識では、紐を繋いで引かないと離れたものも近づけることはできない。棒で突けば離れていく。これが力の相互作用の感覚である。だから、何も無さそうな空間に、エーテルのような何かを想定することになってしまった。

そして、電磁波伝搬という現象が1888年にドイツのハインリッヒ・ヘルツ(1857-1894)により発見され、イギリスのマクスウェルが理論的に「光は電磁波の一部」であることを明らかにした。周波数単位の“Hz”は、ヘルツの名を採っていることは憶えておくべきである。

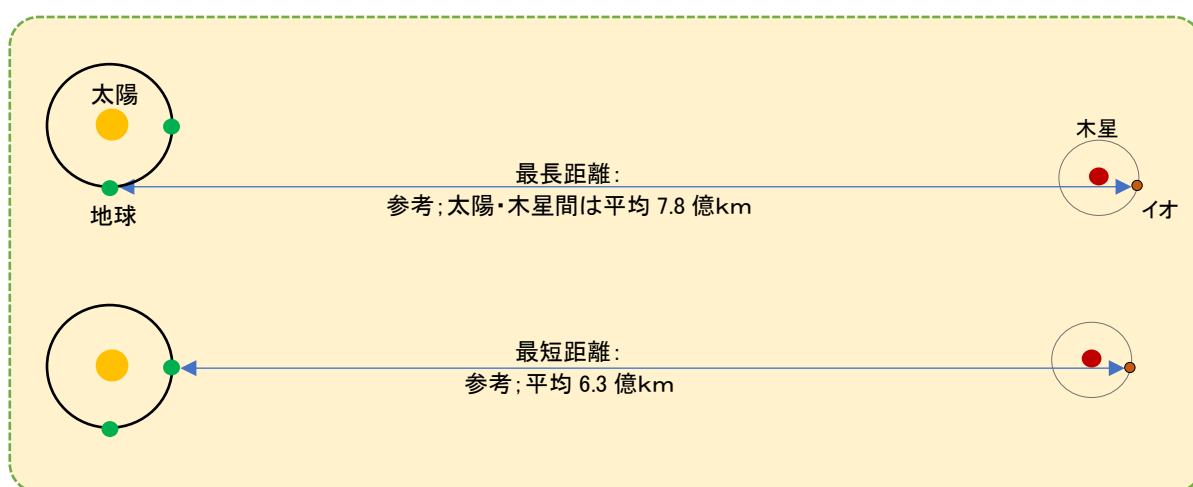
1887年、アメリカのマイケルソン&モーリーの実験で、ついに、エーテルは存在しないことが証明された。これで科学界は騒然となったが、では何が光を伝えるのか、という問題のソリューションは誰も明らかにすることが出来なかった。アルベルトが8歳のときだったが、それを知ったのは16歳を過ぎた頃であろう。正に、物理学界では最大の課題の一つだったのだ。

このような光の問題は、青年アルベルトに一風変わった思考をうながした。それはマイケルソン&モーリーの実験結果の他の一つである「光速度は変化しない」ということだ。つまり、彼らの実験装置における幾何学的な光路の配置である。それは、一つの正方形とその対角線を結んで×にした形状である。これは、地球がどのように動いても、ほぼ縦横無尽になる。地球はおよそ秒速30kmで公転しているから、東西方向では行きと帰りに光の速度差

が出ると考えるのが、普通である。秒速 30 万 km の光速度から計算すれば万分の一ほどプラスかマイナスに変化するはずである。全く変化しなかったのだ。この点に拘った青年がアルベルトであり、彼はそれを「**光速度不変の原理**」として捉えて特殊相対論の前提条件として扱い、結果としてそれを鮮やかに証明した。

### 光速の測定

最初にそれに挑んだ男は、デンマークの天文学者オーレ・レーマー（1644-1710）である。彼は、木星の衛星“イオ”に着目した。つまりイオを地球から見たときそれが木星に隠される食の時間を測定した。イオは 42.5 時間で木星を一周する。地球は太陽を公転しているから木星との距離は短くなったり長くなったりする。幾何学的には、次のような配置になる。



レーマーが測定したのは、イオの食が始まる時間であり、それが平均 42.5 時間より遅くなったり早くなったりする。レーマーの正確な測定系とは異なるが、解りやすくかなりアバウトな上図を参考にすると、地球が自転で木星に近づくと早くなり、遠のくと遅れる。この時間差を計ったのだ。5 ヶ月間をおいて観測した結果、22 分の差が出た。上図では解りやすく、1 年の 1/4=3 ヶ月にして作図したが、実際は地球の位置はもっと離れている。

これにより、1676 年に、史上初めて光速を 21.4 万 km/秒とはじき出したのである。

現在の値は、1967 年頃に精密なマイクロ波干渉計という測定器などで測られたものは次のとおり。

**29.9792 万 km/秒**

有効数字が 6 桁も正確に求められたが、これまで幾度も引用してきた秒速 30 万 km という値が宇宙論の解説では一般的な数値となっている。

なお、アルベルトの時代になると、彼の誕生年の 1879 年にマイケルソンなどによる精密測定がなされ、29.991 万 km という値が報告されており、すでに約 30 万 km という光速の値が科学的常識のようになっていた。私たちと同じく、地球上ではどこでも光は瞬時に届くという一般人の感覚常識は拭えなかった。

しかしながら、アルベルトには、マクスウェルの電磁場方程式から導かれる、

$$\text{電波の伝搬速度} = 1 / \sqrt{\mu_0 \times \epsilon_0} = \text{約 } 30 \text{ 万 km}$$

に興味が高まったのではないか。  $\mu_0$  は真空の誘磁率、  $\epsilon_0$  は真空の誘電率であり、他の物質中では最も低い値である。

ちなみに、いろいろな透明物質内における光速 :  $c$  の値は次のとおり。

- ・ 真空中における光速 =  $c$  (約 30 万 km) 宇宙空間と同じ。
- ・ 空気中における光速 =  $c$  の 99% 大気は薄いから真空と余り変わらない。
- ・ 水中における光速 =  $c$  の 75% カミオカンデではニュートリノが電子を弾いて光速を超え、チェレンコフ光を発生させる。
- ・ ガラス内における光速 =  $c$  の 63% 平均 プリズムによる太陽光の七色分光 (物質中では波長が短いほど光速が遅い。)
- ・ ダイヤモンド内における光速 =  $c$  の 41% ダイヤモンドの輝き

超光速が、実は水の中で発生することは、東大のカミオカンデ、現在はスーパーカミオカンデにおいて、ニュートリノ観測のために鮮やかに応用されている。これは、「この広い宇宙いっぱいⅢ：超新星」において紹介した。

### マイケルソン&モーリーの実験

1887年に、アルバート・マイケルソン (1852-1931) とエドワード・モーリー (1838-1923) によって行なわれた光速に対する地球の速さの比較を行った実験である。つまり、光の伝搬を媒介するエーテルの存在を確認する実験であった。

地球の公転速度は、次の単純な計算によりおよそ秒速 30km と求められる。

$$1 \text{ 周} \doteq 2\pi \times 1.5 \text{ 億 km (地球の平均公転半径)} = 9.42 \times 10^8 \text{ km}$$

$$1 \text{ 年} = 3600 \text{ 秒} \times 24 \text{ 時間} \times 365 \text{ 日} \doteq 3.15 \times 10^7 \text{ 秒}$$

$$\text{地球の公転速度} = 9.42 \times 10^8 \text{ km} / 3.15 \times 10^7 \text{ 秒} \doteq \text{秒速 } 30 \text{ km}$$

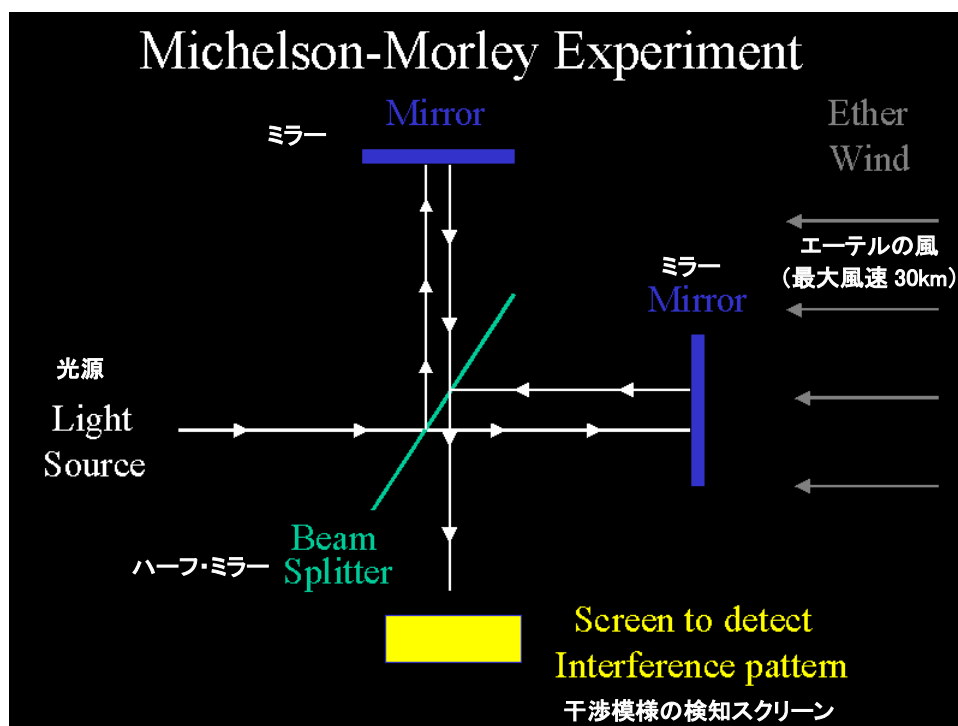
けっこうな速さであるが、秒速 30 万 km の光速に比べれば「万分の一」であるから、僅かなものである。宇宙全体を満たしているエーテルが存在するなら、秒速 30km のエーテルの風が吹いて、その微小な違いにより光の進行の公転方向と逆方向で速度差が起きるはずである。そこで「万分の一」の速度差を識別するには、光の干渉という現象を用いればよい。すなわち、光が遅れたりすれば波長の山と谷がズレて干渉縞が発生する。そのズレは「万分の一」の数値を表すはずである。

光の波長は、中心色 (緑) で約 500nm(ナノメートル) =  $5 \times 10^{-7} \text{ m}$  だから、精度的に充分である。

もともとマイケルソンは、多面鏡による光速の測定で勇名を馳せた人であった。歴史的には彼の記録は 1878 年来、6 回も学会に報告されている。最終的には秒速 299,796km (最新光速値との差 4km : 1926 年) という値をたたき出した。その執念たるやプロの真骨頂でもあ



光路の幾何学的な配置は次のとおり。



<https://faculty.etsu.edu/gardnerr/planetarium/relat/special.htm>

この実験でエーテルの風による干渉縞は発生しなかった。これをもって、二人は正直に「エーテルは発見出来なかった」と当時の科学誌に報告したが、その実験の精緻さはこの世のものとは思えないほどであったから、逆に、

「エーテルは存在しない」

という結論として科学者達に理解された。

結果として、エーテルの存在は否定されたのであるが、アルベルトはそんな亡霊よりも現実的に 360 度、どの方向に実験装置を回しても同じ結果になったことに興味を抱いたようである。不思議な天才としか言いようがない。

マイケルソン&モーリーは、装置の東西方向に拘った。これによって秒速 30km が最大のエーテル風速で加減されるからである。これこそ、「ガリレオの相対性原理」というもので西に向けば光速に地球の公転速度が加算され、東に向けば減算されるという単純な論理である。走っているトラックの荷台からボールを前方に投げれば、投球速度にトラックの速度が加わり、後方に投げれば投球速度がマイナスとなることは、私たちの常識でもあるから。これを光にも当てはまるとした二人の想定は仕方ない。

ところが、アルベルトは

「光速はどこにおいても変化しない」

ということに関心を抱いて、『**光速度不変**』という原理に憑りつかれた。

なお、現在では、地球自体いや太陽系全体が天の川銀河の回転により、秒速約 240km で動いているそうだから、光速の千分の一近くになるのでマイケルソン&モーリーの想定どころの話遥遥に超えている。相対性というのは、この広い宇宙のどこを探しても絶対座標が無いということでもある。座標系の原点を決めてもそれは動いており、静止していないのだから、座標原点を地面に、あるいは太陽に、ひいては銀河系中心に決めても「かりそめ」として理解すべきなのである。



## 特殊相対性理論

光速はどこにおいても変化しない。地上でも、電車の中でも、ジェット旅客機の中でも変わらずに秒速30万kmなのである。秒速千kmで航行する宇宙船は今の技術ではあり得ないけれども、それが可能となるとした想定では、その中でも同じである。

相対性とは、例えば、地上と電車の中における物体運動の相対的な関係をいう。時速100kmで走る電車の中を人が時速4kmで前方に歩くと、地上から見れば人は時速104kmで飛んでいる。これは、ガリレオが注目した「相対性原理」であって、速度が加算される。これによれば、仮に電車を秒速1万kmで走らせて、秒速30万kmの光線が前方に発射されると、それは地上で見ると秒速31万kmになってしまう。人間の頭の空想ではあるが！！マイケルソン&モーリーの実験によれば、そうならない。光速はどこでも秒速30万kmである。

この不思議な現象がアルベルトを悩ました。それ以上に、理工系目標の大学受験生はじめ現代の私たちは不可解な気分が昂じて不愉快にさせられ、さっさとその事を「厳禁不法投棄」という看板の後ろにでも捨て去ってしまう。アルベルトは違った。気になってしょうがなかった。大発見は、いつも傍から見れば狂人みたいな奴によって成し遂げられる。青年アルベルトは暇人と怠け者の中間ぐらいの男だったから、天才の第一条件を満たしていたのではないかと思えてしかたない。天才は無用な努力をせず、絶えず近道を探す性分を備えているものと私は考えているから。彼は、当時、オーストリアで流行り出したカフェに入り浸りがこよなく好きだったようである。そこで、いつも「光とは何か」という想像と思索に耽っていた。後年、彼はそれを「思考実験」と呼んで理論家らしく飾り立てたが。とにかく、鉛筆と藁半紙は手元にあったというから、電車内やスタバでスマホをいじくりまわす今のヤングとは次元を異にする。つまり、字を書くのが人間であり、指先だけが妙に活発なのは猿である。他の猿の毛繕いのように。

そんなアルベルトの眼から鱗が剥がれたイベントは次のとおり。

『 市内バスにおいて発生した。彼は後部に立っていて、何気なく後方の時計台を見ていた。その時、神の降臨のごとく思考実験がよみがえった。このバスを光速で走らせたなら時計台の時計が止まって見えた。光速の半分で走らせたなら、時計が遅れるではないか。』  
と、閃いたのである。

このエピソードにおいて、何が判明したのだろうか？ 私なりに悩み続けたすえに、一つの論理に辿り着いた。速さとは距離を時間で割ったものであるから、速さが一定であることは「距離」も「時間」も変わってしまうことになるのだ。バスの後部でみた時計台の針が遅れたのは、「光速度不変」と観念したから、地上の時計が遅れざるを得なかった。常識では、時計が止まったり遅れたりするのは時計が故障しているからで、時間こそはどこでも「不変」であるという観念で私たちは染まってきた。それゆえに、許せないほど信じられないのである。これを突破しないとアルベルトの思考には迫れない。

これが、1905年にアルベルトが発表した特殊相対性理論の始まりである。物理学的には「慣性系の相対性」という。私たちが、バスに乗って発進するときや停止する時に本能的に用心



する「加速または減速」によるガクーンという衝撃はない世界である。相対とは、静止している場所と動いている場所の相対的な関係を言うが、動いているものどうしても遅い所と速い所でも相対性は同じである。なんとなれば、止まっていると思っている地上でも、前編で述べたように、実際、地球は秒速 30km で太陽の周りを公転して動いているのであるから。

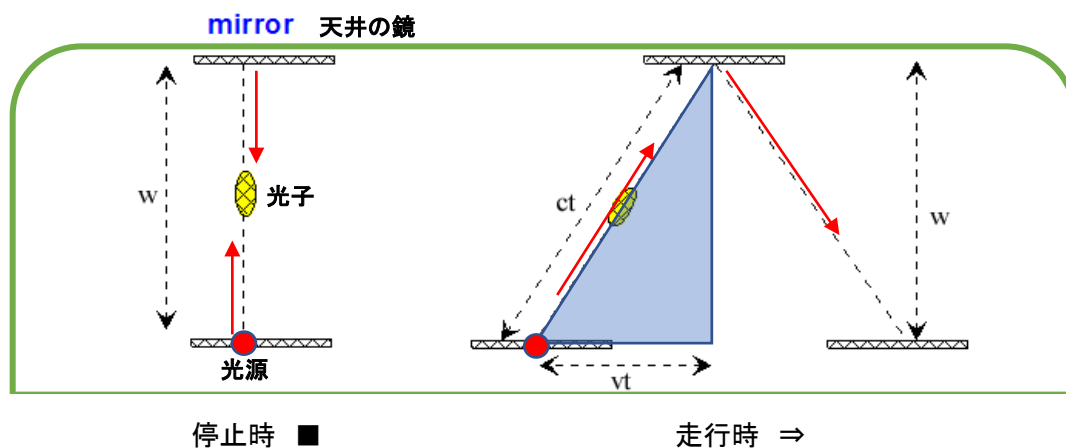
### 特殊相対性理論

ガリレオの相対性原理とは、時速 80km で走っている電車の中で前方に時速 60km で球を投げれば、静止している地上でみると、時速 140km もの速さでボールは飛び、後方に投げれば時速 20km になってしまう、という速さの加減則が成り立つものである。

一方、1905 年のアルベルトの特殊相対性理論では、ボールではなく「光」が動くものとして登場する。しかも、『光速度不変の原理』が前提になっており、速さの加減則は成り立たない。これを分かりやすく説明したものに、電車内の人と電車を外で見ている人を対置して、進行方向に向かって横に走る光線に関する話が常套で語られてきた。しかしながら、これは余計に常人に分からなくしていることは否めない。そこで、私なりに、参考図書を漁った結果、同じ電車内でもいきなり光速度不変を前提にして述べようと考えた。

### 時間の遅れ：電車内と外

電車の中で光線が走った場合、電車内の人と外で立ち止まって見ている人を想定する。電車は、仮想的に長さ 10 万 km 程度とするが、現実にはこんなに長い車両はあり得ないが、そこは思考実験である。電車の速度も秒速数万 km とする。



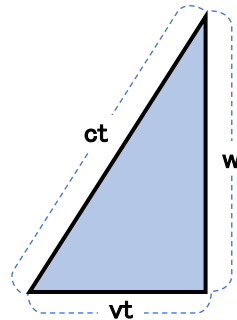
停止している時には、天井高： $w$  は、 $w = ct_0$

( $c$  は光速、 $t_0$  は停止時に天井に届く時間)

これは、地上で見ている人も同じである。

秒速数万 km (v) で走行している電車の中で床から発射された光線は、車内の人からみると停止時と同じく天井と床を往復している。が、車外の立ち止まっている人から見ると、上図の右のように、斜めに光路ができ、天井の鏡に反射されて返ってくるように見える。

その光路の半分を切り取ると次のような直角三角形になる。



ピタゴラスの定理によれば、  $(ct)^2 = w^2 + (vt)^2$

$w = ct_0$  を代入すると、  $(ct)^2 - (vt)^2 = (ct_0)^2$

走行時の時間 :  $t$  は、  $t = t_0 \times c / \sqrt{c^2 - v^2}$

$$t = t_0 / \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

というふうに、速度  $v$  が光速の  $3/5$  とすると、25%ほど長くなる。車外からは車内の時計が遅れて見える。

これは、車外の観測者から見ると、電車走行時の車内時間 :  $t$  は、車内の時間つまり停止時の時間 :  $t_0$  より大きくなる。結果、遅れていると車外からは見えるのである。車内では遅れていない。あいもかわらず  $t_0$  のままである。 $v=c$  すなわち光速で電車が走ると時間  $t$  は無限大になり、それは時間が止まっていることを示す。 $v=0$  すなわち停車していれば時間  $t$  は  $t_0$  と同じになる。

前述したアルベルトの思考実験で、バスの後方で時計台の時計が止まって、あるいは遅れて見えたことは、全く逆の現象で、観測者がいる車内が止まっていて、車外の時計台が動いているものとして説明できる。まさに相対論の極みである。

そして、この時間の遅れに関する計算式は、既に電磁波理論において、オランダの物理学者ヘンドリック・ローレンツ (1853 - 1928) が見い出していた。これをアルベルトは知らずに独自にはじき出したのである。しかも、物理的考証を踏まえ、物理的意味を付加したのだ。ローレンツはそこまで解析していなかったという。

しかしながら、この式における係数はいろいろな特殊相対論の公式にて頻繁に現れることから、「ローレンツ因子 (Lorentz factor)」と、後年の物理学者たちは呼んできた。

$$\text{ローレンツ因子： } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

このファクターによる変換を「ローレンツ変換」とも呼ぶようになった。

なお、電車内から外を見ると、外が逆方向に速さ： $v$  で走っているように見えるが、同じような思考実験を行うと、全く同じ結果を導ける。これこそ、相対性たる所以である。

### 長さのローレンツ収縮

電車における長さ＝距離も縮まる。縮まらないと「光速度不変」とならないのである。すなわち、時間が遅れると同様に長さも収縮すれば光速は変化しない。

停止時の電車の長さを  $L_0$  として、前述どうように電車の走行時の長さ： $L$  は、詳細を省くと、時間の遅延と同じようになる。これを「ローレンツ収縮」という。

$$L = L_0 / \gamma$$

$$L = L_0 \times \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

例えば、 $v=c \times 3/5$ 、 $L_0=30$  万 km にすると、電車の長さ  $L$  は、外から見ると 0.8 倍の 24 万 km に縮んでしまう。

外から見た車内の時間は、 $1/1.25$  に遅延するから、光速  $c$  は、

$$24 \text{ 万 km} / (1/1.25) \text{ 秒} = 30 \text{ 万 km} / \text{秒}$$

となり、光速は外から見ても車内で見ても同じであり、光速度不変が保たれている。

## 質量の変化

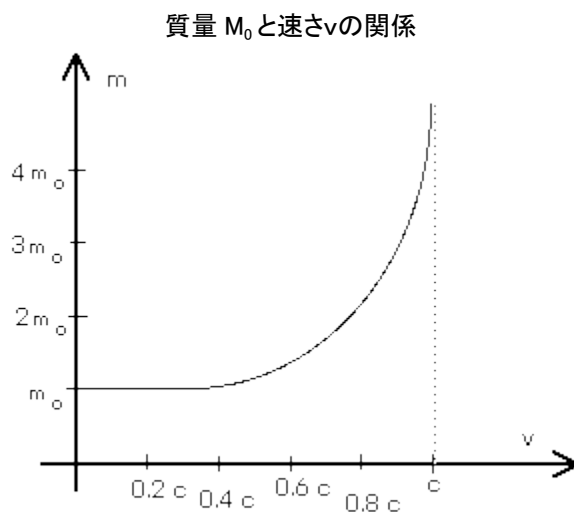
重さ（質量）も変わる。停車時の電車の質量： $M$  と、走行時の質量： $M_0$  との関係は、ローレンツ因子により次のようになる。

$$M = M_0 \times \gamma$$

$$M = M_0 \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

電車の重さを10トンとして、走行時の速度  $v$  を光速の  $3/5$  にすると、走行時の質量は12.5トンに増えてしまう。その関係グラフは右図のとおりである。

この図から、速度が光速  $c$  に近づくと質量は無限大になっていく。ゆえに、物体の速度は光速を超えられない。光速こそ、この広い宇宙における最大速度であり、何も超えられない。



<https://www.ux1.eiu.edu/~cfadd/1160/Ch27SpRl/Mass.html>

2～3年ほど前に、CERN（欧州原子核研究機構）のとあるチームが、ニュートリノ観測実験で光速を超えるデータが得られ、大騒ぎになった。日本の二流評論家もNHKの番組でこれを大きく報道した。確か、あのニュートン誌を発刊し、啓蒙活動に熱心だった理学者竹内均の子息であったと思うが、バカらしさにあんぐりした覚えがある。それから1ヶ月を過ぎた頃、超光速の観測結果は実験装置のバグだと判明して報告された。バツが悪いのは、CERNだけでなく、その評論家の拙速報道はさらに拙い。

### ガリレオの相対性原理

ガリレオの相対性原理は、静止系と運動系の間で速度と距離の単純な加減算が成り立つものであるが、アルベルトの特殊相対性理論によると、次のようになる。

$$x_0 = (x + vt) / \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

外の立っている人から見ると、走行電車が  $x$  だけ進んだとして、車内の速さ  $v$  の球の距離  $vt$  が加算される。特殊相対論に拠れば、ローレンツ因子がからんで面倒な計算になるのが解る。電車の速さも球の速さ  $v$  も百 km 程度では、 $(v/c)^2$  は 0.0000003 となり、ゼロに近くなって  $\sqrt{\quad}$  の中の値は殆ど 1 になるので、分子の “ $x+vt$ ” だけになる。これを時間  $t$  で割れば速度になり、速度の加算も同様である。

結果、ガリレオの相対性原理は特殊相対論に包含されてしまっている。

新理論は、それまで確かであった旧理論を包含しないとイケない。ソフトウェアの世界でも、新バージョンは旧バージョンを含んで互換性を保つことが義務となっているように。

### マックス・プランク

ベルリンの物理学の専門誌に特殊相対論の論文が掲載された 1905 年、その編集責任者でもあった大物の物理学者マックス・プランクの鋭い眼がとまり、彼を唸らせた。彼は、黒体放射スペクトルを初めて解明し、量子論の黎明期を開いた偉大な科学者である。

プランク定数

$$h : 6.62607004 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg / s}$$

を求めて、その後の量子論で常に広く使われているものである。力学で言えば、万有引力定数  $G$  に対応する。“ $h$ ” は最小単位の量子を代表するもので、具体的には、プランク時間、プランク長など幅広く応用されている。

プランクは、アルベルトのスカウトを狙っていた。1913年、ドイツ皇帝名を冠した新設のカイザー・ヴィルヘルム研究所の物理学部長として招請することになった。しかも、直接、ミュンヘンに向いてアルベルトを説得したのであるから、アルベルトの感激はひとしおであったことは容易に想像がつく。この研究所は、現在、ドイツ国立の「マックス・プランク

研究所」に様変わりしている。現在は、日本の宇宙物理学者小松英一郎が同研究所の宇宙物理学所長に就いている。

そして、1915年、住み慣れたチューリッヒからベルリンへと移る。この時の研究所長が、彼の親友となるフリッツ・ハーバーであり、アルベルトにとっては欠けがいのない後援者になるのである。

この時には、既に、一般相対論の枠組みが出来上がっていた。



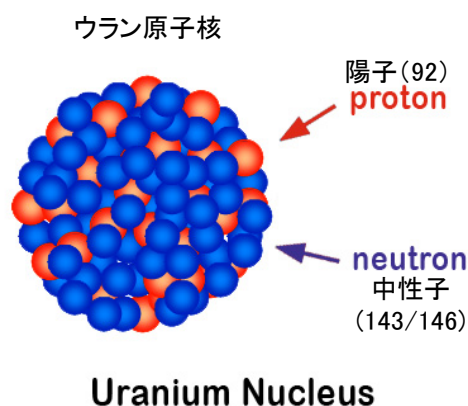
## 物質の静止エネルギー

特殊相対論は一般に軽いイメージがあるので、私たちの眼はどうしても一般相対論に引き付けられてきている。ここで述べる静止エネルギーについては、その応用も含めると轟絶な効果に呆気にとられてしまうにちがいない。

私は、若い時に湯川秀樹（1907 - 1981）の中間子理論に興味を抱いた。1949年（昭和24年）にノーベル物理学賞が湯川博士に授与されたという歴史を知ってからである。それは中間子が核力を媒介するという理論である。我が国では、戦前に、理化学研究所の仁科芳雄博士の研究室に帝国陸軍から妄想に近い原子爆弾の開発が要請されたようである。その仁科に協力したのが湯川であった。当時は、明確な核分裂現象が解明されていなかったから、とにかく研究しようということになったのだろう。そこで湯川は原子核における核子である陽子と中性子を結合させる力、すなわち『核力』の解析に没頭したという。

後で気付いたことであるが、陽子と陽子は同じプラス電気を帯びているので、斥力によりくっつかないし、無理に結合させても即座に離れてしまう。ということは、硬い原子核に集まっているのは、何か別の力が働いていると考えるのは尤もなことである。陽子と中性子、中性子どうしも反発力はないにしても密着していること自体、不思議である。何か強力な接着剤が存在するのだろうか？

天然ウランは主に二種類があり、核子が235個と238個である。いずれのウランも原子核に92個の陽子をもっているので原子番号は92であり、中性子を143個もつウランは「ウラン235」と呼ばれ、中性子を146個もつウランが「ウラン238」である。これらは同位元素（アイソトープ）という。**ウラン235**こそ活性化しており、絶えず放射線を出して核分裂しているから、核爆弾の材料になり得る。ただし、天然には安定したウラン238に0.7%しか含まれていない。



[http://www.ganil-spiral2.eu/science-us/understand-ganil/fundamental-principles?set\\_language=en](http://www.ganil-spiral2.eu/science-us/understand-ganil/fundamental-principles?set_language=en)

核分裂したらどうなるかよりも、どうして結合しているのか。その解明が先決だった。湯川の閃きは、中間子という得体の知れない陽子や中性子よりも小さな粒子を仮想し、1934年、それらの間を往来して緊結力すなわち『強い力』が働いているのであろうと想定した。その中間子を核子間でキャッチボールしているから強い引力が働いているという理論を組み上げた。この作用の有様は、素粒子論が落ち着いた現在でも“グルーオン（糊粒子）”として使われている表現であるから、湯川理論はまさに当を得たものであった。それよりも、歴史的には初めて湯川が「強い力」と言われている核力の仕組みを解き明かしたことこそ、私たちは誇るべきである。

そして、戦後まもなく1947年になって宇宙線の観測から中間子が発見され、ノーベル賞に輝いたのである。とにかく、戦中に原爆開発などという悪魔のプロジェクトに突入しなくて済んだ、と私は胸を撫でおろした思いがある。戦前に生まれてもいない私が言っても始まらないが。実際は、核分裂とその連鎖反応という過程がまだ朧（おぼろ）であり、それに加えて先進国で一番貧乏な大日本帝国の経済力では、おぼつかなかったとも窺える。仮に、仁科チームにより明確な原爆製造プロセスが出来たとしても、ウラン濃縮自体で当時の5年分の国家予算が吹っ飛ぶものと推測できる。また、石油の輸入が途絶えた戦中にこれが報告されたら、いかな怒号連発、虚飾の戦果公表、かつ、空威張りだらけの帝国陸軍参謀本部でも青くなったにちがいない。さすがに、現在のNK王朝のようにICBMと核弾頭開発に国のなけなしの外貨資金を浪費して、国民の飢餓・貧困を知らんぷりするほどひどい連中ではなかったはずだ、と思いたい。

このような原爆の凄惨さを覗わせるのが、言葉的にはおとなしい「物質の静止エネルギー」である。アルベルトの特殊相対論のメスは、途轍もないほど凄まじい、隠れている宇宙の『パンドラの箱』の鍵の一つを開けてしまった。



だから、ノーベル賞受賞後、湯川がアメリカに渡り、そこでアルベルトに会ったとき、アルベルトは、湯川に涙を流しながら「日本のなんの罪のない人たちを原爆で苦しめてしまい申し訳ない。」と謝罪したという。アルベルトの人間性を如実に物語っている。

彼は原爆開発に参画していない、ただ、ドイツに先行されることを恐れ、原爆開発の早期着手について時のルーズベルト大統領に進言しただけであるのに。同じユダヤ人でも、原爆開発の「マンハッタン計画」を主導したえげつないオッペンハイマーとは、人道主義の点で格段に違う。

<https://www.kahaku.go.jp/exhibitions/tour/nobel/yukawa/p4.html>

$$E = mc^2$$

特殊相対論の醍醐味は、エネルギーの解析で最高潮に達する。

まず、ニュートン力学以来、動体の運動量は次のように定義されてきた。

$$mv \quad (m \text{ は物体の質量、} v \text{ は物体の速さ})$$

これを  $v$  で積分したものが運動エネルギーである。

$$\frac{1}{2} mv^2$$

特殊相対論では、ローレンツ因子を伴ってエネルギーは次のように導かれる。

$$E = mc^2 \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

私の能力を超えているが、これをテイラー展開して近似的に表すと。

$$E = mc^2 + \frac{1}{2} mv^2 + \dots$$

$$\text{【静止エネルギー】} + \text{【運動エネルギー】} + \dots$$

物体の速さが光速よりだいぶ小さければ、“……”が無視できるから、見事に静止エネルギーと運動エネルギーの足し算になってしまう。数理的にこれを証明することは、私が困難の極みに陥ることを意味する。

【参考】 <http://math-lab.main.jp/taylor2.html>

大学で習ってきた関数のテイラー展開について

無限等比級数の公式

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots + \frac{x^n}{n!} + \dots$$

$$\sin x = \frac{x}{1!} - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \dots + (-1)^{n-1} \cdot \frac{x^{2n-1}}{(2n-1)!} + \dots$$

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \dots + (-1)^{n-1} \cdot \frac{x^{2n-2}}{(2n-2)!} + \dots$$

$$\log(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \dots + (-1)^{n-1} \cdot \frac{x^n}{n} + \dots \quad (-1 < x \leq 1)$$

$$(1+x)^\alpha = 1 + \alpha x + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2!} x^2 + \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{3!} x^3 + \frac{\alpha(\alpha-1)\dots(\alpha-n+1)}{n!} x^n + \dots$$

これらのうち最後の公式が使いそうであるが。

結果として、あらゆる物質は、次の静止エネルギーを擁している。

$$E = mc^2$$

ここまで来ると、特殊相対論も宇宙の摂理に入り込んでしまう。

- ① エネルギーと物質の質量とは、係数  $c^2$  を介して等価なのである。
- ② したがって、ホーキングの言うとおり、宇宙には究極的に [空間、物質、エネルギー] の三つしかないと思っていたが、実は【空間とエネルギー】の二つになってしまうのだ。

- ③ これが、ダークエネルギーも物質として勘定にいれているのが、宇宙の物質密度であり、第5回の「ビッグバン」にて掲げた。
- ④ 同様に第5回で述べたとおり、インフレーション宇宙論では真空のエネルギーが超光速で膨らんで物質を大量に産み出すと言っている。すなわち、エネルギーが物質に様変わりする。
- ⑤ だが、 $mc^2$ は本当にエネルギーになるのだろうか？ [次の課題へ]

## 核分裂

これこそ予想外の発見から始まる。

第二次大戦が始まりそうな1930年頃、オーストリアの化学者オットー・ハーンと物理学者リーゼ・マイトナー女史(1878-1968)の共同によるウランへの放射線照射実験において端を発した。1938年にはヒトラーにオーストリアが併合されたことから、彼女はスウェーデンに亡命した。

その後、リーダーであるオットー・ハーンから「放射線(中性子)を照射したウランが分裂してバリウム Ba が生成され、ウランと分裂片の合計質量が元のウランよりわずかに減少した」という手紙を受け取った。化学者の彼はその物理的な解釈は専門外だったから、その検討を依頼したのである。

この現象を紐解いたマイトナーは物理学者の甥のオットー・フリッシと議論しながら、次のような計算検証を行った。

- A. バリウム原子核と他の分裂核(想定:クリプトン)の運動エネルギーを計算。これは二つの核は陽子の塊りによるプラス電荷どうして働く反発クーロン力で、電磁気力によるもの。
- B. 特殊相対論 “ $E=mc^2$ ”により、減少質量分が変貌して放射されたエネルギーの計算。



[http://www.geocities.jp/takahashi\\_mormann/Articles/lisemeitner.html](http://www.geocities.jp/takahashi_mormann/Articles/lisemeitner.html)

これら A と B の計算は科学者の常套手段である“クロスチェック”という。これらの結果はピッタリと一致したのである。アルベルトの理論のうち怪しかった “ $E=mc^2$ ” が具体的に実証されたのだ。当時は一般相対論よりも衝撃的であった。

厳密には分裂で生じる二次中性子のほかに放射線エネルギー ( $\beta$ 線や $\gamma$ 線)もあるから、AはBよりも極めてわずかに小さいはずである。が、問題はこの二次中性子がいくつ射出されるかであり、原子爆弾に発展する「連鎖反応」の可能性についての研究につながった。マイトナーとフリッシが1939年始めに公表した後、即座に、世界中の研究機関にパンデミック伝染した。第二次大戦前夜の出来事である。以下に、マイトナーの功績を解説した記事を掲げる。

2015年2月10日

## 76年前、核分裂を初めて記述したリーゼ・マイトナー

76 Years Ago Lise Meitner First Described Nuclear Fission

<筆者訳>

*"I love physics with all my heart ...*

*It is a kind of personal love, as one has for  
a person to whom one is grateful for many things."*

- Lise Meitner, 1915

「私は胸がはち切れんばかりに物理学が好き・・・。

それは自己愛の類い、人がたくさんのもので感謝している人のために抱く気持ちのような。」

リーゼ・マイトナー、1915



1939年2月11日に、オーストリアの物理学者リーゼ・マイトナーとオットー・フリッシュは、考えられないような、ウラン原子が二つのより軽い原子、バリウムとクリプトンに分離したことを記述した「自然における1頁ノート：one page note in Nature」を公表した。彼女らは、この過程について分裂“fission”という造語をあてた。それはアナログ的で生物細胞の分裂過程のようで、世界中の原子核物理研究所に瞬く間に飛び火した。

しかし、その発見はマイトナーにとって正に悪い時にやってきて、核分裂の実験と理論的発見において両方とも彼女の主導的立場は適切に賞されなかった。

1878年生まれのマイトナーはオーストリアの教養豊かな家族の中で育て、若い時に科学と数学に才能を示した。だが、オーストリアは1897年まで女性の大学入学を許さなかったために彼女の大学進学は遅れた。

「私は早くから数学と物理が大変好きだったが、すぐに研究生活を始めなかった。」と彼女は後でつぶっている。振り返って考えれば、「普通の若い娘達の生活において、いかにたくさん問題があったか、人はある程度の驚きに気付くもの・・・これらの問題の最も難しいところは、普通でも知的な修練の可能性であった。」

集中的な勉強の数年後、1901年に、マイトナーは23歳で大学受験に合格してウィーン大学に入った。彼女は数十年後に思い出したことであるが、大学教育でのハイライトは、著名な物理学者ルードヴィッヒ・ボルツマンによる講義のシリーズだった。彼女はすべてを電磁気学から熱力学へと乗り換え、そして、彼の講義は「かってないほどもっとも美しく刺激的」と感激した。

マイトナーの物理研究は、二つの劇的な発見が割れない原子の外観を永遠に変えた――電磁的なふるまいが、1896年に電子が、1897年に発見されたこと――でもって彼女の未来の



仕事の舞台が決まった。

27歳の1906年にマイトナーは、熱伝導の実験研究に対して博士号が贈られた。ウィーン大学で物理学の博士になったのは彼女が二人目の女性だった。

多くの大学は依然として女性が教育陣の位置に着くことを禁じていたし、彼女の研究に資金が付くことなどはもってのほか、彼女が研究室に場所を確保することにも問題だった。光学と放射能の双方における短期間の研究プロジェクトを完了した後に、マイトナーは、ウィーンはこれ以上彼女に何も与えないことに気付いて、1907年、尊敬する物理学者マックス・プランク（1858–1947）の研究施設があるベルリンに移った。

プランクは最初に、マイトナーの物理学を追求する意欲に驚かされた。早い時期にプランクの家を訪れたとき、彼女は「君は既に博士なのだ。もっと欲しいものは何か？」と彼に言われたことを思い出した。それでも、プランクは彼女に彼の講義に参加するのを許し、時には、放射能分野における科学を確立したオットー・ハーンと一緒に実験する仕事を見つけていた。

マイトナーの経歴の物理学は、ハーンの化学専門知識を補完して彼らの共同作業はそれから31年間も続いた。この間、各種の放射能崩壊プロセスとプロトアクチニウム（原子番号91）元素の発見に係る大変実りある共同研究を達成した。彼らは、ベルリンの南西部に新しく建設されたカイザー・ヴィルヘルム研究所(化学): KWI に研究室を移した。そして、彼女は、マックス・プランクの生徒の論文評価により筆頭助手としての最高給の辞令を受けた。これは、彼女の自助努力と独立感という意識に活力をもたらした。

「特に何年もの研究開発においては、自分の選択したやり方が間違っていないと知るために、人は即座に外部から認められることを必要としていることを私はよく知っている。」と、マイトナー70歳のときに振り返っている。1919年までに、KWIにおける教授の位に達していた。かなり真っ当に、この位を獲得したドイツにおける最初の女性であった。

しかしながら、反ユダヤ主義がドイツで湧き始めた。マイトナーはユダヤ人の血統を持っていた。ドイツにいる彼女の同邦者たちは速やかに逃げたが、マイトナーはぎりぎりになるまでベルリンに留まった。彼女のラボと同朋たちはすべてを彼女に寄せ、そ



Lise Meitner and Otto Hahn  
in the KWI



ベルリンにおける曾て核分裂が発見された  
カイザー・ヴィルヘルム研究所(化学)



して核物理学の分野は輝き続けた。アーネスト・ラザフォードは1919年に陽子の発見を報告し、1932年までに中性子も見つけられ（同じ頃、陽電子は1932年に、重水素は1931年に）、原子核の基本的構造が完成しつつあった。そのような画期的な発見に伴い、マイトナーは益々去ることが困難になってきたことに気付いた。

KWIは最初、非アーリア系血統の人々やナチス党に参加することに倫理的になじめず拒んだ人たちのための安全な避難所であった。そんな人としてマイトナーとハーンの研究室に1929年に加わったフリッツ・シュトラスマンがいた。1934年、マイトナー、ハーン及びシュトラスマンはウランの研究を始めた。もとより重たい元素で、その未知のスパーク反応をみるために中性子を照射させることである。5年後に、彼らの共同作業は核分裂の発見において頂点に達するものであったろう。

しかし最初の2～3年間、彼らの衝突実験はマイトナーを困惑させた。彼女の物理学者としての役割は、妥当な反応を伴った化学的観測結果を説明することだった。そして、彼女は増えていく期待外れの放射線崩壊の過程を書き留めていく自分をみていた。

最初、ハーンとマイトナーは、中性子による衝突実験は対象物の原子番号を少しだけ増減させるだけだろうという物理学上の確信に基づいて、いわゆる超ウラン元素（ウラニウムより重たい元素）を作り出すことであった。成果物はウラニウムのすぐ下の元素のように見えなかったため、二人は重い新元素にちがいないと結論した。これについては、1935年～1938年に出版されたものに見られるが、それはかつての反応過程を正当化するにはかなり困難であった。

1938年、ドイツはオーストリアを併合すると、突然、マイトナーのオーストリア市民権とパスポートが廃され無効となった。有効なパスポート無しでは彼女は旅行できなくなり、さらに、ユダヤ人の血統が彼女のドイツ・パスポート取得を阻んだ。急いで、彼女は無期限の罨にかかる前にドイツを去り、ついにはストックホルムに安全な場所をなんとか確保した。1938年7月にベルリンを去るときには、彼女の実験は中途のまま、本は書棚に、彼女の学生たちはほとんどが彼女の出発を知らされないままであった。



核分裂を発見した実験器具：  
ミュンヘンにおけるドイツ博物館

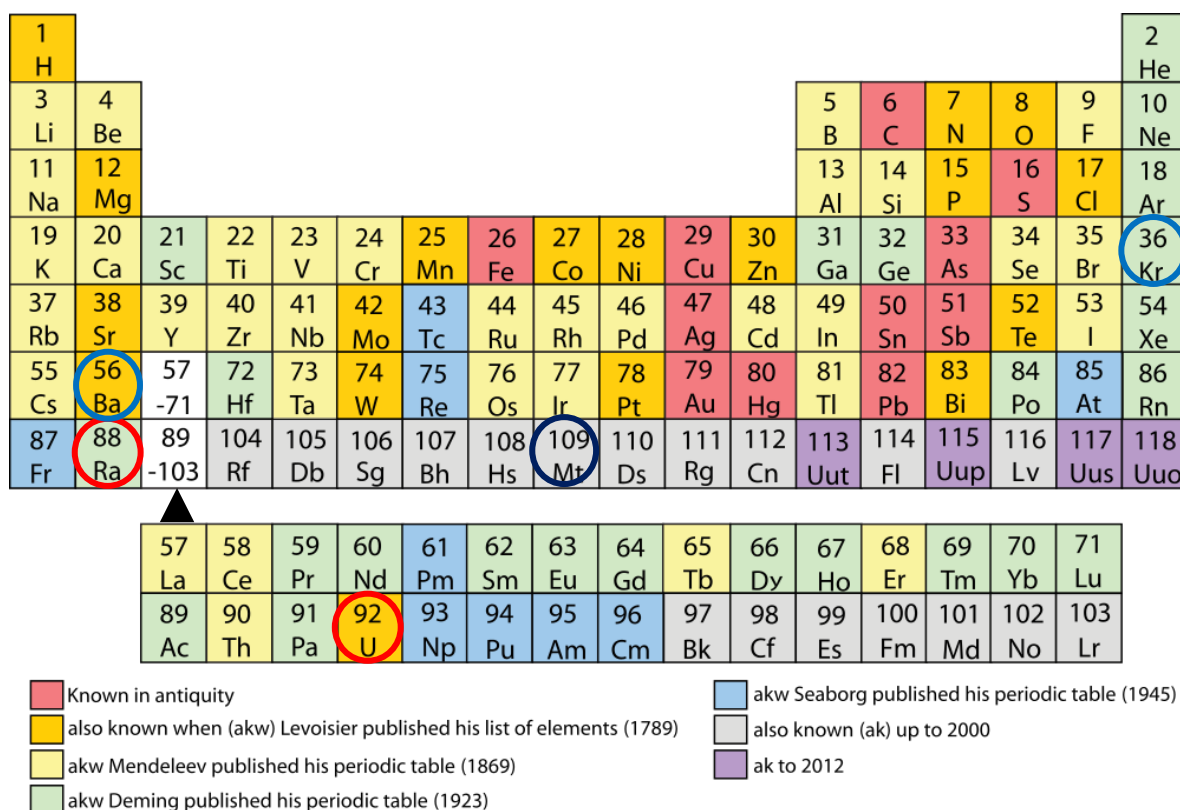
[筆者註： たいがいの著名な科学者達は大学や研究所に在籍していた。しかも、ナチス・ドイツの武器開発について数多の要請にさらされていたから、結果として、科学者たちはナチス本部の動きにかかる情報に一番近い存在だったのである。だから、危険を知らせる情報も早かった。このため、彼女はオーストリア併合という時期とそのナチスの支配が行き届くまでの期間が少しだけあるのに気付いたのか、ハーンなどの友人の科学者に知らされたのか判らないが、とにかく「オーストリアのパスポート」が無効として末端のナチスの警備

に徹底されるまでの隙間で取るのものもとりあえず命からがら逃げたのである。ちなみに、アインシュタインは彼女より数年早く1935年に米国に亡命したのだが、トップ・レベルの科学者ほどナチスの残虐性（ヒットラーの「我が闘争」を読んでいたのであろう。）に早期に気付いていたと言えるのではないだろうか。]

ストックホルムで新生活に慣れるまでに、1938年の遅い時期にマイトナーはハーン及びシュトラスマンと周期的に文通していた。それらは実験結果に対しての解釈助言だった。

1938年12月19日に、ハーンはクリスマス休暇の前に最終的な実験結果のセットを彼女に送ってきた。「実際、ラジウム同位元素に関する何かである。今は君にだけ伝えるべき目覚ましいことだ。・・・我々の同位元素はバリウムのように振る舞っている。・・・多分、君なら驚くような説明をまとめることができる。我々自身、それが実際に破裂してバリウムになることは無いと知っている。」

ウラニウム・サンプルに中性子を衝突させた後、期待された生成物ラジウム (Ra) の代わりに、ハーンとシュトラスマンはバリウム (Ba) だけを見出した。かなり小さい元素である。ウラニウムより少し大きいか少し小さい一元素を何年も探してきた後に、彼らは最終的に真実は全く違ったことに気付いた。マイトナー、ハーンとシュトラスマンはウランが二つになったことを気付かずにおり、バリウムの存在を実験的証拠として確認していた。



### 元素の周期律表

研究室からマイトナーが出て5ヶ月しか経っていなかった。そして、ハーンの親展レターは彼女が依然としてチームの一部であることを明確にしていた。実際、ハーンに想定したラジウムの代わりに彼が見つけたバリウムに関する更なるテストを促したのはマイトナーだった。

その崩壊過程の包括的な物理的解釈がないまま、ハーンとシュトラスマンは 1938 年 12 月 22 日にバリウム生成結果について出版・公表してしまった。

ハーンの手紙を受け取ってすぐに、マイトナーはクリスマス休暇で甥の物理学者オットー・フリッシと一緒にスウェーデンの東海岸への旅に出た。マイトナーとフリッシはハーンがバリウムを見いだしたことに関して、即座にその物理的説明の検討を行った。原子核が水滴のようにふるまうと、ニールス・ボーアが提案したことを思い出した。この可視化にともない、二つに分かれた水滴のアイディアがすぐに明らかになった。

フリッシの記憶では、基本理論から計算している間に彼がマイトナーとの雪道の散歩を思い出した。

「この時、我々は切り株に腰をかけて、紙の切れ端で計算を始めた。ウラン原子核の電荷は確かに表面張力効果を完全に破るに十分なほど大きい。つまりウラン原子核は大きすぎてフニャフニャとうねっており、不安定な水滴で、僅かな刺激（例えば一つの中性子の衝突）により割れてしまう状態にある。」

マイトナーは、電荷の反発力によりお互いに素早く離れる二つの分裂片の運動エネルギーの計算も行った。そして、このエネルギーは小さいが想定どおりの質量の変化によって供給されたものとピッタリと合った。その質量変化分はアインシュタインの

$$E=mc^2$$

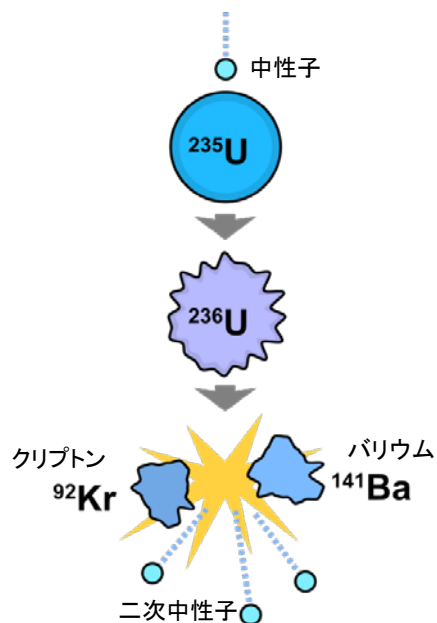
によるエネルギーになって消えたのだ。

この**簡潔で優雅な方程式**は、突然、意味を持ち、何年もの不可思議な実験結果と複雑な理論を一気に解決した。

発見の一部になることを心配し、それと昔の同朋と一緒に発行することが不可能であることを知り、マイトナーとフリッシは短いノートをネイチャー誌に向けて急いで準備した。核分裂の理論的過程を記述する以外に、フリッシは速やかにいくつかの単純な実験を行った。それは彼らが予想したエネルギー豊かな反動生成物を見つけるためのものである。

1939 年 1 月 16 日に、マイトナーとフリッシは、フリッシの別の実験論文とともに理論的な核分裂論文を投稿した。彼らの共同論文において、マイトナーは分裂過程の後半も予測した。仮にウラン（陽子数 92）が二つに分裂して片半分がバリウム（陽子数 56）とすると、他の半分が、加算してウランの陽子数になるためには陽子数 36 のクリプトン（Kr）になるはずである。

この論文は、1939 年 2 月 11 日まではネイチャー誌に掲載されなかった。しかし、その間に、世界中の研究所はハーンとシュトラスマンの論文を読んでおり、興奮して彼ら自身の実験を遂行しはじめた。そして、彼女から核分裂について聞いていたボーアは、1 月中旬に米



ウランの核分裂:バリウムとクリプトンへ

国に旅行中にマイトナー理論をうっかり漏らしてしまった。マイトナーは既に個人的に彼女の水滴ドロップ理論をボーアに話して議論しており、それから彼女は分裂過程について、まだ秘密裡と言うことを忘れて、他の物理学者とともに検討していた。

結果的に、言葉は即座に拡がり、フリッシは思い起こした。「一つの驚異的なレースが既に多くの米国の研究所で進んでいた。・・・私が既の実現した核分裂の断片を検出するのと同じような簡単な実験を成し遂げるために。」

ちょうどその時、マイトナーとフリッシの論文出版は、彼らの理論と最初の核分裂の物理的検出の優先性を保ったまま 2 月 11 日に刊行された。

ハーンとシュトラスマンはまもなくクリプトンの実在とその崩壊生成物を確認したが、それを予言したマイトナーの役割を全面的に認めなかった。彼女の理論的論文にはほとんど言及しなかった。彼女はこのあしらいに傷ついて、「私があなた達の素晴らしい検出とは独立に、一連の Kr-Rb-Sr の存在の必然性に帰着したことをあなたが書いてくれたなら、それは私にとってどれだけ丁重だったろうか。」と、ハーンに手紙に書いた。

[筆者註]

Kr: クリプトン(krypton)は原子番号 36

Rb: ルビジウム(rubidium)は原子番号 37

Sr: ストロンチウム(strontium)は原子番号 38

ハーンは核分裂発見におけるマイトナーの貢献を最小にし続け、ナチスの体制下における研究の恐れとは関係ないように

した。そして、1944 年に彼は単独で核分裂発見に対するノーベル化学賞が授与された。多くの科学者たちはマイトナーが不公平に外されたと感じた。そして、選定に不備があったとの指摘が起きた。ノーベル選定委員会は、マイトナーとフリッシの貢献度を再考するために、実際に 1944 年の化学賞表彰を延期した。しかしながら、1945 年に選定委員会の決定を変更すべきであるという投票は僅かだった。シュトラスマンも、その実験における弛まない貢献にも拘わらず、去って行った。

後年の幾多の推奨は除いて、マイトナーは決してノーベル物理学賞を授与されなかった。彼女は、しかしながら、マックス・プランク・メダルを含み、皮肉にもオットー・ハーン賞が、そして死の直前の 1966 年に、フリッシとともにエンリコ・フェルミ賞が与えられた。1997 年とかなり遅くではあるが、マイトナーは、また、マイトネリウム (meitnerium : Mt ; 原子番号 109) という元素名に冠されるというめったにない特典を授かった。

マイトナーは、原子核の外観を変えた尋常でない実験と理論的発見という永遠の伝説を残して 1968 年に逝去した。さらに、彼女の研究について几帳面であり続けた。マンハッタン計画が最初に確立された時、マイトナーは原爆開発を支援することを拒否した。後に言っている、「すみません、その爆弾は(私とフリッシにより)既に発明されました」と。

彼女の死において、フリッシは「リーゼ・マイトナー：絶対に人間性を失わなかった物理学者」と彼女の墓石に銘記した。

マイトナーが核分裂論文を出版してから 75 年後、アメリカ物理学会 (APS) は、サン・ア



ワシントン DC で講義中の  
マイトナー(1946)

ントニオで開かれた 2015 年の 3 月会合で、より広い社会メディアの福祉・教育への貢献としてマイトナーを認めている。マイトナーは、APS ツイッターにて人気投票により選ばれたのだ。そして、前年の物理学者ニコラ・テスラとリチャード・ファインマンに並んだ。APS は、彼女が物理学者を鼓舞しつづけること、著しくそして輝かしい物理学者として際立つことを望んでいる。

By Tamela Maciel, also known as "pendulum (振り子)"

.....<http://physicsbuzz.physicscentral.com/2015/02/76-years-ago-lise-meitner-first.html> .....

### 連鎖反応

これはアルベルトに関係ないが、行きがかり上、語らねばならない。

多くの一般人は見たくもないだろうが、NK 王朝の断末魔の妄動を目の前にして知りたくなるのも人情であろう。

#### (1) 二次中性子

核分裂後に発射される中性子はいくつか？ 2 個以上でなければ次のウランにぶつかって分裂が増え、連鎖反応にむすびつかない。オットー・フリッシはこれが 3 個であろうと予測したが、実際は、**2.6 個**という実験結果が報告された。これにより、2 個は確実となり 2 の乗倍で増え、100 回も連続すると  $2^{100} \approx 10^{30}$  ものウラン原子核が分裂する。

#### (2) 放射エネルギー

オットー・フリッシの実験によって 1 個のウラン原子核の核分裂では、2 億電子ボルトのエネルギーが放射されることが判った。1 kg のウランには  $10^{24}$  個もの原子核があるから、とんでもないほどのエネルギーが放出される。

単純な計算に拠れば、1 kg の純度 100% ウラン全部が核分裂すると、TNT 爆弾相当で 20 k トンの爆発エネルギーと同等になるという。つまり、1 トンの TNT 爆弾を 2 万発同時に爆破させた場合と同じになる。爆発時のウラン塊は百万度～1 千万度の灼熱になるらしい。この 1 千万度という温度が、水素の核融合を励起するので、次の水爆に利用されることになる。

実際的な**臨界質量**は、ウラン濃縮率は 100% に届かないから「5 kg」程度になると推測されていた。大きさは野球のボールほどである。

分裂の都度発射される中性子の速度は秒速 1 万 km ほどであるから、順調に連鎖すれば、10 万分の一秒で全ての原子核が分裂し、瞬時に、実際は 1  $\mu$  秒ほどで爆発して、放射線とそれに続く猛烈な衝撃波という爆風が発生して、半径数 km の範囲を破壊して焼き尽くす。さらに、放射能を放つ分裂片が飛び散りその被害は何年も続く。まさにその地域の人々にとっては破滅的な様相となる。

#### (3) 二次中性子の減速



中性子が速すぎると次のウラン原子核にぶつかる確率が低くなる。ウラン 238 は、「共鳴吸収」という現象で中性子を捕捉して食べてしまう。ウラン 235 は、遅い中性子でも当ると容易に分裂する。このため、核分裂させるためには重水：D<sub>2</sub>O などにより遅速させねばならない。これは、特に実験や濃縮装置で必要となる。

#### (4) 天然ウランの半減期

ウラニウム 235： 半減期 7 億年。崩壊方式は、 $\alpha$  崩壊；ヘリウム原子核を放出して、トリウム-231 (231Th、1.06 日) となる。最後は鉛になる。

ウラニウム 238： 半減期 45 億年。崩壊方式は、 $\alpha$  崩壊；ヘリウム原子核を放出して、トリウム-234 (234Th、24.1 日) となる。最後は鉛になる。

235 は、天然ウランに 0.720% 含まれ、天然に存在する唯一の核分裂性放射能物質である。238 は、地球誕生 45 億年前に相当するほど長い。太陽系がつけられた時から存在し、地球上では地殻に多く含まれ、マントルには少ない。

### ウラン 235 の濃縮

これこそ、原爆製造における巨大な障壁であった。経済力が無ければ、当時は製造不可能を意味していた。現在のように純度の高いウラン 235 やプルトニウム 239 によりあちこちの国々で、例えば歴史的に掲げると中国、イスラエル、インド、パキスタンなどの開発途上国でも原爆が造られてきたのは、第二次大戦中か戦後まもなく大国（米（英）・ソ・仏）が大量に作りすぎて、その一部が闇で仕入可能になったからである。

しかしながら、時代が代わって、原爆の凄惨さと非人道性が叫ばれ、国際的に核拡散防止条約や核兵器禁止条約などが、核保有国が既得権益を棚上げして、先格権という我田引水で結ばれた。さらに、平和利用としての原子力発電がそれ自体の限りない不安な放射能汚染という暗い側面を拭えないために、意外に伸びなかった。仏はそれでもキューリー夫人の偉大かつ膨大な遺産を引き継いで発展させ、なんと 80% を超える国内の電力需要を原子力発電で賄ってきた。いまだに続いて、オイルショックにビクともしなくなっており、しゃあしゃあと原爆・水爆実験も行い、自力で原子力立国を遂げてきた。こういった不埒とも言える国の人々が人道主義や地球温暖化対策（パリ協定）を唱えている。

しかしながら、需要が減って在庫過剰に落ち込み、買い手市場にもなった。だから、東アジアの極貧の国でも悪魔の取引に拘らないゾンビ（生き返った死人）になれば、容易に手に入り、あとは製造技術のコンサルティングを受ければ出来てしまう。人は人を食食物して、別の人はその人たちを非難して食食物にしている輪廻は止まらない。こうした人間の修羅性を減速するのは、やはり、この広い宇宙の開拓しかないのではないだろうか。アメリカの西部開拓時代に、あり余る欧州からの移民が押し寄せてきて飢えたエネルギーを発散させ、結果、広大な西部の開拓により経済力を大幅に増大させたアメリカの知恵に（米国自身も）習うべきである。原爆開発における科学者総動員でも同じ



ように、そういった欧州の移民から受けた大きな恩恵を、仕事が奪われるからという理由で中南米のラテン系はだめと、現在の米国が忌避しているのは皮肉でもある。移民受入れは、建国時の最高戦略だったはずであるのに。

さて、連鎖反応の第一候補は、ウラン 238 でなくウラン 235 である。ウラン 238 はぶつかってきた中性子を「共鳴吸収」という現象で捕食してしまい、分裂しない。絶えず分裂するウラン 235 は、しかしながら、天然ウランの中に“0.7%”しか含まれていないから、例えば 1 kg のウラン 235 だけを抽出するのに 143 kg 以上のウランが必要となる。さらなる困難は、常道的な化学反応では化学生成物が全く同じ化学的特徴、すなわち他の元素との化合物が全く同じになるように、分離不可能である。残るは物理的操作であるが、それでも違いは質量差を利用した遠心分離となるが、質量比は  $238/235 \approx 1.013$  しかない。

遠心分離というアイディアは湧くが途方もない。それでも、その方法しかなかった。今でも基本的なアイディアは同じである。このため、数千段階の巨大な濃縮施設が必要となり、数十兆円の投資と数年の運用年数が避けられない。そのようなことが可能となる経済力のある国家は、当時は、アメリカ合衆国しかなかった。最近では、イランの核開発でウラン濃縮施設が査察されたが、やはり膨大な施設であり、90%以上の濃縮に数年の年月を必要としていたらしい。イランには、自国の原油産出があって、濃縮に係る最大のエネルギー問題はなかった背景も見逃せない。

そこで、1940年頃、20%程度の半端な濃縮ウラン 235 の活用に気付いた科学者たちがいた。

## フェルミの登場

さすがに科学者である。ストレートなウラン濃縮に困難があるなら、濃縮が遅くともゆっくりと進行させる比較的規模が小さい施設をつくって、超ウラン原子を生成し、これを原子爆弾の核燃料に使えばよいことが判った。このアイディアはイタリアから米国に亡命してきたエンリコ・フェルミ (1901-1954) により提案された。彼は中性子照射実験で有名であり、彼も米国のおおらかな受容に包まれてコロンビア大学に落ち着いた。その目的は原子番号 93 以上の超ウラン原子の生成である。マイトナーとハーンが試みたものと同じである。分裂を発見するには至らなかったが、同時期に、フェルミは「遅い中性子ほどウランの核分裂を増進すること」を見つけた。

さらに、鈍感 238 は、1000~10 電子ボルト以下の低エネルギーの遅速中性子に対しては「共鳴吸収」という中性子の無駄食いが起きないことが判明した。過敏 235 は遅い中性子ほど分裂しやすい。これは、中性子を減速させれば二次中性子の数を減らさずに 235 に当てられるのである。まさに一石二鳥であった。235 濃縮という難関を避けられるのである。

二次中性子はだいたい 100 万電子ボルトであるが、これが極端に低い 0.03 電子ボルト程度の「熱中性子」に下げられないか。これに最適なものが「重水」であったが、こ

れを作るのは 235 濃縮に次ぐほどに難しい。そこでフェルミらに探し当てられたのが、鉛筆の芯と同じグラファイト（黒鉛）であった。ただし、重水が平均 18 回なのに対して 114 回もグラファイトに弾性衝突させないと熱中性子ができない。

弾性衝突とは、ライフルの実弾に対するゴム弾のように当たった板に跳ね返されることを言うようである。ただし、爆発的な連鎖反応にはむすびつかない。

### アインシュタインの関与

1939 年、ハンガリー出身のユダヤ人科学者レオ・シラード、ユージン・ウィグナーそしてエドワード・テラー（水爆の父）の三人が相談して、時のルーズベルト大統領に「原爆開発の早期着手」について進言する手紙を書くことになった。しかし、あまり有名でない三人は、その手紙が大統領に届くはずがないと考えた。悩んだ末に、アルベルトに現在進行中のウラン 235 の連鎖反応実験の現状を克明にレクチャーして、手紙を書いてくれるよう懇願した。これを聴いたアルベルトは、その現状に驚愕したという。彼ら三人同様に、ナチスに先を越されることに恐れをいだいて承諾した。その手紙は、1939 年 9 月下旬に大統領に手渡されたようである。

さすがに驚いたルーズベルトは、しかし、「マンハッタン計画」としてその着手を決めたのは 2 年余り後の 1942 年であった。

### 起爆トリガー

マイトナーの甥オットー・フリッシは憑かれたように連鎖反応を追いかけながらも、イギリスに落ち着き、原爆の構造に思い至った。それは、宇宙線の中の中性子でいつ爆発するか分からない臨界質量の 235 は保存も危険すぎる。それでそれを二つに分けて起爆時に一緒にする考えだった。ただし、小さな中性子源はどっちかに付けておく。これをライフル同様に打ち込めば瞬時に爆発的な連鎖暴走が起きる。と想像した。これは、後にガン・タイプと呼ばれた。

### ダークホース

1940 年、カリフォルニア大学バークレー校のマクミランとアベルソンは、ウラン 238 の核分裂生成物の分析を行っていた。二種の分裂片を調べた結果が次のとおり。

半減期が 23 分のもの	複合核 239：愚鈍なウラン 238 が中性子 1 個を吸収して、半減期 23 分で $\beta$ 崩壊して陽子 1 個が増えたもの。
	↓
約 56 時間(2.35 日)のもの	陽子数（原子番号）が 93 の新元素 → 超ウラン元素

この新元素は、**ネプツニウム**と名付けられた。ウラニウムの名が天王星＝ウラナスから採られ、その次は海王星＝ネプチューンとなるので、その名が冠された。

さらに、ネプツニウム発見後、同じ大学でグレン・シーボーグが二人の研究を引き継いだ。さらに、イタリア出身のエミリオ・セグレが加わったが、彼はローマでフェルミ・チームの一員だった。二人は、陽子数 94 の超ウラン元素の発見に注視した。そのためには 100 万電子ボルト以上の中性子ではなく、238 を核分裂させない遅速中性子の放射源を求めた。そのために減速材としての水素分子が多いパラフィン紙を用意して中性子を減速して照射実験を行った。

その結果、次のように微量ながら段階的にウラン 238 が変貌することが判った。

- ・陽子数が 92 の複合核ウラン 239
- ・陽子数が 93 のネプツニウム 239
- ・陽子数が 94 の超ウラン元素 239 → ???

この段階を追うと、超ウラン元素はかなり微量であった。この新元素の確認は、ヘリウム原子核を放出する $\alpha$ 崩壊という現象で判明した。ウラン 238 は 235 よりも半減期が長いほど $\alpha$ 線放射エネルギーは低いから、これらと異なるエネルギーの $\alpha$ 線を出す原子を探せばよい。懸命に観測した結果、ついにそれが確認できた。

その新元素（原子番号 94）は、海王星の外の冥王星＝プルートから**プルトニウム**と命名された。

さらに、プルトニウム 239 はウラン 235 と同じく敏感でどんな速さの中性子が当たっても分裂する。陽子数：中性子数＝偶数：奇数の組合せは放射能的に活発であるという。しかも半減期は約 8 千万年と長い。原爆材料の第一条件を備えているが、なにしろ微量しか生成されない。

ついに鈍感 238 が敏感プルトニウム 239 に変身したのだ。しかも、238 は 235 の百倍以上も存在する。微量とはいえ、その第一条件は原爆製造に必要な条件となるので、1941 年 5 月、ナショナル・アカデミー化学委員会に報告された。

戦後、しばらくしてこの生成過程が増殖炉として発展し、我が国では、その基本構造と機能が、ほぼ失敗した高速増殖炉「もんじゅ」に採用された。

### **ガス拡散法によるウラン濃縮**

1940 年 1 月に、ニューヨークのコロンビア大学にてユーリーとダニングが、ガス拡散法に依るウラン濃縮装置の開発を始めた。

これは、天然ウランを六フッ化ウランという化合物のガスをつくり、拡散させる方法である。235 の方が僅かに軽いから、早く拡散する。しかし 238 より僅かな差しかない。「拡散」とは、A タンクに溜めた六フッ化ウランの高圧ガスを、A タンクに開けた小さな複数の穴から隣の低圧 B タンクに吐き出すことにより軽い 235 のガスが先に出ることにより濃縮させる方法である。それでも僅少である。同じことを B タンクから C タンクへ行うことにより濃度がわずかに増す。これを C から D へ、D から E へとリレーする。これを何千段と重ねれば、0.7%であったものが数%から数十%へと 235 濃度が

上がる。

これにより原爆材料となりうる濃縮度90%程度が達成される。それでも、巨大な施設と膨大な電力量を必要とするのだが。一応、他の方法よりも有望であることが判ってきた。

### **プルトニウム生成部隊**

1941年秋には、シーボーグが考えたパイルまたは原子炉による連鎖反応持続装置の開発のため、シカゴ大学物理学教授コンプトンの呼びかけにより、シカゴ大学に全米から核物理学者・工学者たちが招集された。彼らを率いる英才エンリコ・フェルミも加わって、「ガス拡散装置によるウラン濃縮」と二枚岩になる「連鎖反応持続装置によるプルトニウム増殖炉」の開発体制が整った。

### **原爆開発**

1942年（昭和17年）5月、米国国防研究委員会傘下のS-1ウラン委員会にて、原子爆弾の研究開発成果がまとめられて、次のように報告された。

- 一． 原子爆弾の材料には、ウラン235とプルトニウム239がある。
- 二． ウラン235は微量しかないので、濃縮が必要。濃縮には、熱拡散法、電気磁気法、ガス拡散法がある。
- 三． プルトニウム239の生産には、核分裂連鎖反応持続装置パイルを建設する必要がある。（パイルとは、もともと土木・建築の基礎工事で打ち込む杭（くい）のことであり、現代では直接的に「原子炉」を指すことが多い。）
- 四． 技術的、経済性、時間的そして成功率、これらを調べてどれが有利か決定するデータが無い。すでに米国は戦争に巻き込まれており、時間的余裕もない。「二」と「三」という二つのタイプを同時に実行することが要望される。

こうして、1942年6月17日、計画実行に大統領の許可が下りた。予算は出来高だったのであろうと考えられる。

核分裂の研究が集中していたコロンビア大学があるマンハッタン地区で始まったから、コードネームが「マンハッタン計画」になっただけでいい。管轄は陸軍となり、グローブス将軍が任命された。この将軍は、最近、機密書類の公開と査読により、なんと単独で広島と北九州（小倉→長崎）に原爆投下を命じた張本人であることも判ってきた。1945年当時のトルーマン大統領は命令しなかったのだ。（NHK特集より）

そして、グローブス将軍により原子爆弾研究所が設立され、オッペンハイマーが所長になり、具体的な実行段階に移された。

## シカゴ大学冶金研究所

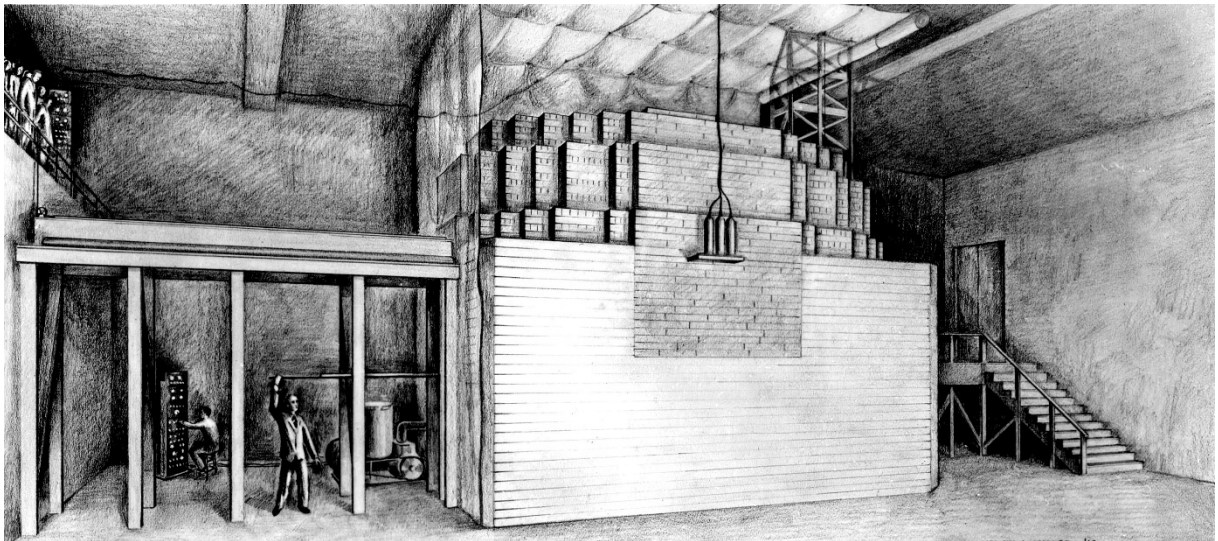
フェルミたちは、シカゴのフットボール競技場のアルプス・スタンドの下にあった室内スコッシュ・コートに「連鎖反応持続パイル」(CP-1 : Chicago Pile 1) を建設した。シカゴ大学冶金研究所の施設として衣を被せた。ここで、彼らは中性子増倍率 :  $K$  を定義し、 $K > 1$  になって連鎖反応してしまう暴走を抑えること、臨界  $K \approx 1$  というギリギリの 1 以下の値 ( $K = 0.9999$ ) を保って連鎖反応を安定的に進行させる実験を始めたのである。このために中性子検出装置を考案して据え付けた。

パイルの構造は、グラファイトの中に格子状に酸化ウランと金属ウランの塊りを埋め込んだもので、「ぶどうパン」のようである。コントロール・ロッドという制御棒は、中性子吸収率が高いカドミウムを材料として作った。これをパイルの横穴に出し入れして、中性子増倍率  $K$  値を見ながら中性子の増減を操作したのである。これにより、ウラン 238 からプルトニウム 239 の増殖をじわじわと進めていった。

1942 年 12 月 2 日には、コンプトンの目の前で人類初めての核分裂連鎖反応を実現させて見せた。この施設と運用実績が、やがての原子力発電にむすびつくのである。

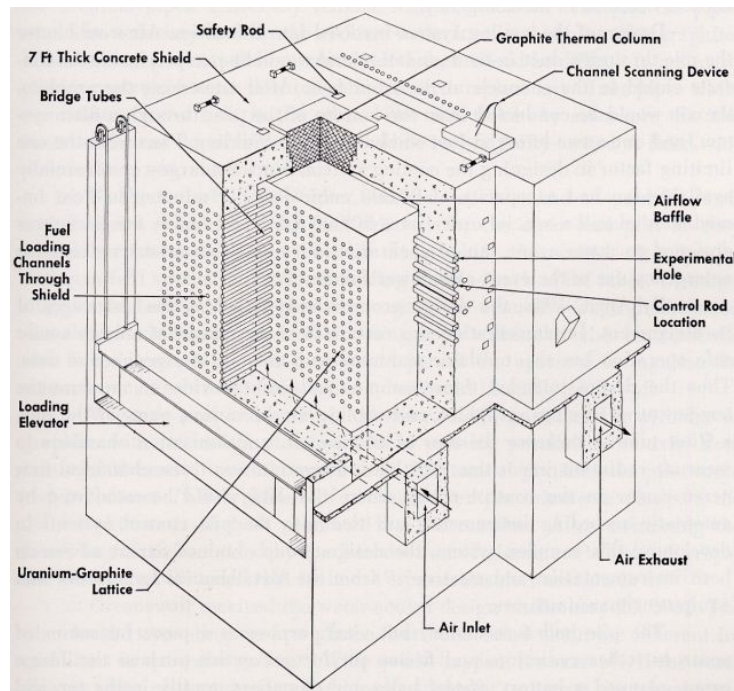
ただし、防護服や放射能遮蔽などほとんどなかったようであるから、ラジウム発見のキュリー夫人と同じであった。キュリー夫人が使用した手袋からは、今でも、放射能がガリガリと放出されているのをテレビで見た人もいるだろう。先人の科学者の執念は、死の恐怖もなんのその、であった。

Artist Sketch of CP-1



<http://www.atomicheritage.org/location/chicago-il>

## Schematic of the X-10 Graphite Reactor, Oak Ridge



[https://www.osti.gov/opennet/manhattan-project-history/images/x10\\_schematic\\_image.htm](https://www.osti.gov/opennet/manhattan-project-history/images/x10_schematic_image.htm)

なお、CP-1 は実験施設として、プルトニウム増殖生産工場は、テネシー州のクリントン地域に建設された。同時に、ウラン濃縮工場として、電気磁気法、熱拡散法、ガス拡散法の三つの施設もできた。後には、オークリッジ国立研究所と呼ばれた。

本格的なプルトニウム増殖炉は、遠く太平洋に面したワシントン州のハンフォードに建設された。これは、出力を上げると膨大な熱が発生するので、大量の冷却水（海水）が必要となるからである。生成されたプルトニウムの抽出が最後の厄介な問題となる。

### **ガス拡散ウラン濃縮工場**

1942年9月、235濃縮に一番有望なガス拡散施設を同じクリントン（テネシー州オークリッジ）に造成した。数百どころではなく数千段階のガス拡散タンクが必要とされる。そして、全長800mのU字型の工場ができた。拡散ステップは2,894段にも達した。とにかく、キチガイじみた汗みどろの建設が進められたのである。

プルトニウム増殖と併せて、一説には計20億ドルが使われたといわれている。その価値は、時代を超えて物価変動と、現在の通貨の円に照らして換算すると、100兆円ぐらいになろうか。これはだいたい現在の1年分国家予算額であり、太平洋戦争当時の国家予算は27億円と言われている。まともな経済がとおっていた戦前（1931年）は1ドル＝5円（1945年：15円）の為替相場だったから、20億ドル⇒100億円となって、少なくとも4年分の国家予算が吹き飛んでしまう。仮に、大日本帝国陸軍の将軍たちがこれを知り得たなら、腰を抜かして口から泡吹いてショック死するだろう。そうなった方が、いまの私たち日本人はもっと幸せになったかもしれない。

だから、「無知と未知」つまり陸軍と海軍に対比されるが、その違いほど恐ろしいことはない、私は言い続けている。海軍は水兵レベルさえ訓練航海で米国の文明も経済も知っていたから、長引く戦争は、輜重 (logistics) という経済力に敵わないという未知の疑問を持っていた。原爆開発ほどロジスティックスがモノを言う場面はない。

### **ロスアラモス**

1942年7月、オッペンハイマーが原子爆弾製造研究所の所長に就いた。その設置場所は、ニューメキシコ州サンタフェの北西部、**ロスアラモス**という台地である。ここに、全米から百人以上の物理学者、数学者、工学者など稀代の俊英たちが総動員され、しばらくしてイギリスからも核物理関係の科学者連が合流した。

結果的に言えば、彼らはウラン 235 とプルトニウム 239 による原爆の開発に成果を上げた。それぞれ、コードネームが「リトルボーイ」と「ファットマン」と名付けられたことは、余りにも有名すぎる。特に後者は、**爆縮**という新技術を開発して、戦後の核爆弾の主役を演じることになる。

1997年の映画「ピースメーカー」を観ると、もうファットマンの面影はなく、大きさはグレープ・フルーツほどであり、制御部を併せても大きさはフットボールより少し大きめで、ナップザックで背負って運べるほど (10 kg以下) である。興味があってまだみてない人は、これを是非観てほしい。



## リトルボーイ

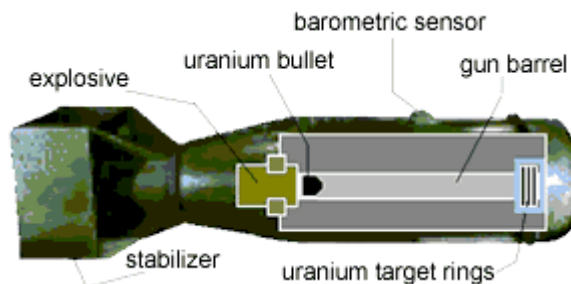
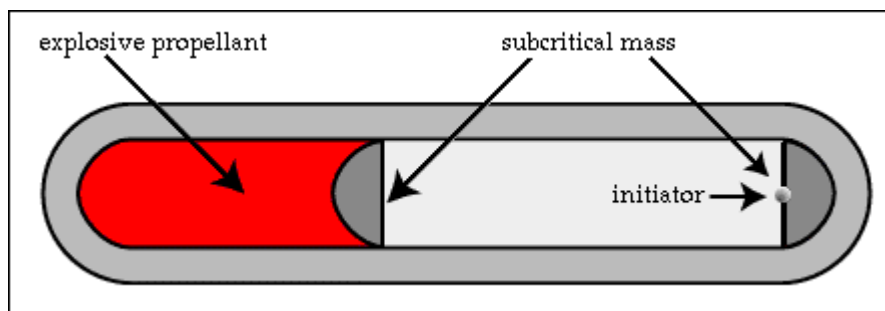
原子爆弾とは、ウラン 235 かまたはプルトニウム 239 の核分裂の連鎖反応を促進して初めて出来上がる。最初の問題が臨界質量だった。つまり、放置しても絶えず分裂しているから、自らの一つの核分裂でもその放射中性子（2 個以上）で連鎖反応を起こしてしまう限界質量である。

ウラン 235 は、100%濃縮したものなら、1 kg 程度が臨界となるが、現実的には濃縮度 80 ~90%程度が生産の限界となるから、5 kg 前後が適当となる。けれども、これさえ一つの塊りにすると自爆的連鎖反応が生起するので、危険極まりない。

このため、臨界質量のウラン 235 塊を二つに分けて、起爆直前にライフル弾丸のスピード：秒速 1 km 弱で結合すれば良いことが判明した。これが、ガン・タイプの原子爆弾である。ただし、エンジニアリング的には、ショック吸収として（余分な中性子捕食して漏洩を防ぐためにも）ウラン 238 のように重くて硬いタンパー（鎧）が必要になることと、瞬時の起爆トリガーとしてイニシエーターなる小さな中性子源も中心に装備しなければならない。調査の結果、ポロニウム=ベリリウムの対に拠ればよいことが判った。ポロニウム 210（原子番号 84）は絶えず分裂してα線を放射しており、これがよくベリリウム（原子番号 4）を原子核反応させて中性子を出すので、ウラン 235 を瞬時に連鎖爆発させることが出来る。このため、結合しておく危険だから、これも別々に離してウラン 235 塊を二つに分けたそれぞれに装着しておけばよい。

このように研究されて製造されたリトルボーイは、実験しなくても確実性が高いとして、最初の一発が広島に投下された。

[http://ffden-2.phys.uaf.edu/212\\_fall2003.web.dir/Matthew\\_Kampen/Slide\\_3\\_Bomb\\_Design.html](http://ffden-2.phys.uaf.edu/212_fall2003.web.dir/Matthew_Kampen/Slide_3_Bomb_Design.html)



## ファットマン

いよいよ、プルトニウム 239 の出番である。これは、放射性のほかに毒性も強いから取扱いは要注意である。ウラン原子炉廃棄物の中でとても厄介者であり、我が国は再処理工場を青森県の六ヶ所村に建設したが、いまは不具合により 20 数度にわたり稼働延期されてきた。どうも、うまく運用開始できないようである。これが稼働すれば、原発廃棄物のプルトニウムが再処理精製されて原子力発電の燃料として再利用できるのだが。現在は、全国の原発廃棄物として 20 トンほど貯まっているという報道があった。巷では、再処理が出来ればすぐにでも核爆弾が製造できて、小型ロケット（例えばイプシロン）の弾頭に装備出来るという話がまかり通っている。

ロスアラモスの研究所では、なかなか、その原爆製造設計の目途がつかなかった。

問題は、自発性核分裂によりプルトニウムの塊が臨界量に近くなると、自走連鎖反応が起きて核爆発する恐れが消えない。だから、臨界未熟のプルトニウムを扱うしか方法がないのだ。臨界質量にはるかに及ばない濃縮度にししないと危ないから、ウラン 235 のように塊を二つに分ける方法も使えない。あきらめるわけにはいかない。しかしながら、プルトニウム増殖炉は、その最中に貴重な電力エネルギーを供給してくれる魅力は捨て難い。

そこで、イギリスのチームなどから爆縮、“**Implosion**”というアイディアが出された。爆発（**Explosion**）ではなく、無理やりに“西瓜（スイカ）”のような濃縮未熟プルトニウム塊を圧縮する手段である。そうすれば、プルトニウム原子どうしが接近して、中性子が当たる確率が急増して瞬間的に臨界量に達したことと同じになるのではないか。

しかして、プルトニウム爆弾の形状が議論になって、数学者も交えて正六角形と正五角形の組合せによる 32 面体が最適となった。これは、サッカー・ボールと同じである。

ところが、爆薬と爆風の専門家によれば、32 面の爆薬の衝撃波は内側に円形状に拡がってしまうから、隣どうしの爆圧の微妙な違いで散乱してしまい、僅かでも弱い方向に衝撃波が集まって普通の爆弾になってしまうという。これには頭が痛かった。そこで編み出されたのが、衝撃波の**凸レンズ爆薬**による集束である。この二次的な爆薬のレンズとして、爆発の遅いものを真ん中にすえて、早いものを外側にくっつける構造が提案された。そうすると、一次衝撃波（凸面）がそのレンズ爆薬で拡散せずに二次衝撃波（凹面）となって中心に収束され、32 面同時に爆発すれば 32 面体の中心にある臨界未熟の“西瓜”を壊さずにきれいにつぶして臨界以上のカボスができあがる、という想定が成り立った。

素晴らしいアイディアである。こういった開発こそ、まさにエンジニアリングの独壇場となる。さらに、精密な 32 面体の製作、ズレてもマイクロ・セカンド以下での同時爆発という電気制御など、数多のエンジニアが活躍したのだ。

こうして完成したのが、次頁に掲げるファットマンである。

しかし、部分の組合せで爆縮システムは出来てもトータルでの実験が必須である。ついに、1945年7月16日に、ファットマンの実験“トリニティ”がニューメキシコの無人砂漠で実行され、予想どおりの成果というか衝撃的な核爆弾の威力がみられた。

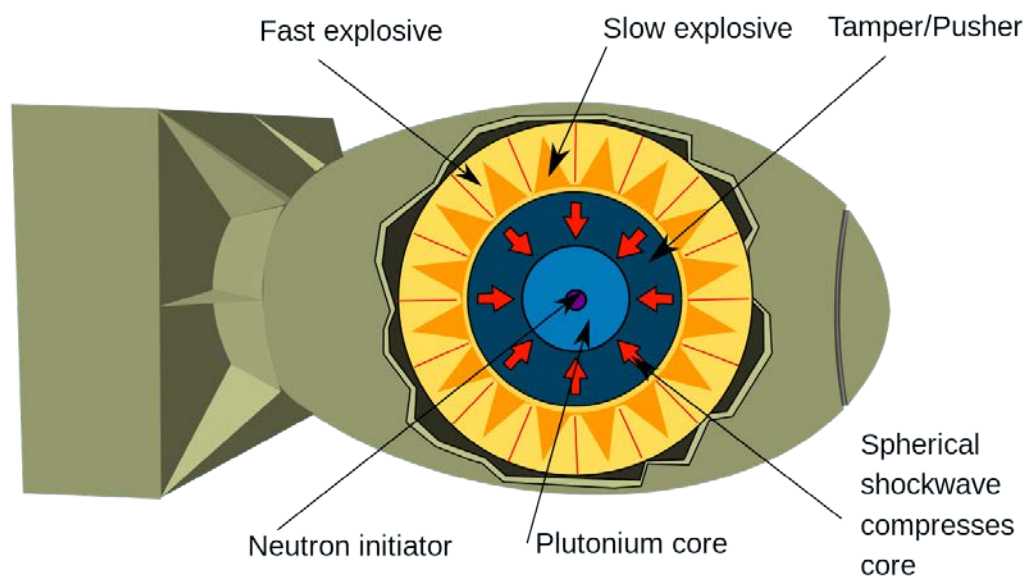
このファットマンは長崎（当初は小倉）に投下され、広島同様に見るも無残な惨状を残し、私たち日本人には、未来永劫、消すことが出来ない原爆への恨みが根付いた。

なお、広島・長崎への投下はトルーマン大統領の命令だったという歴史は、つい最近、見直された。米陸軍の原爆製造総責任者であるグローブス将軍の独断だったらしい。トルーマンはマンハッタン計画をヒアリングしたとき、原爆の使用に腰が引けていたという。

実は、1945年7月下旬になって「ポツダム宣言による日本の無条件降伏」を帝国陸軍はじめ日本国政府が逡巡し、知らんぷりして、米国をイライラさせたことが第一である。第二は、本土上陸による米軍死傷者数を、米軍がシミュレーションしたら、少なくとも20万以上にのぼったことである。すなわち、サイパン、ペリリュー、硫黄島、沖縄と転戦したデータから必然的に予測された。米軍はさすがにそれを恐怖したと言われている。

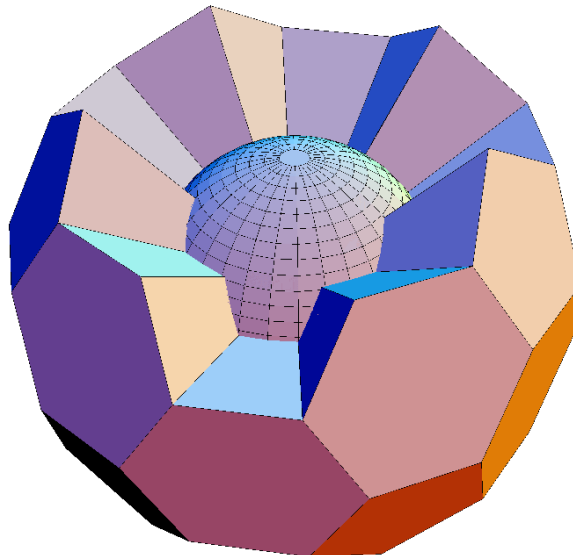
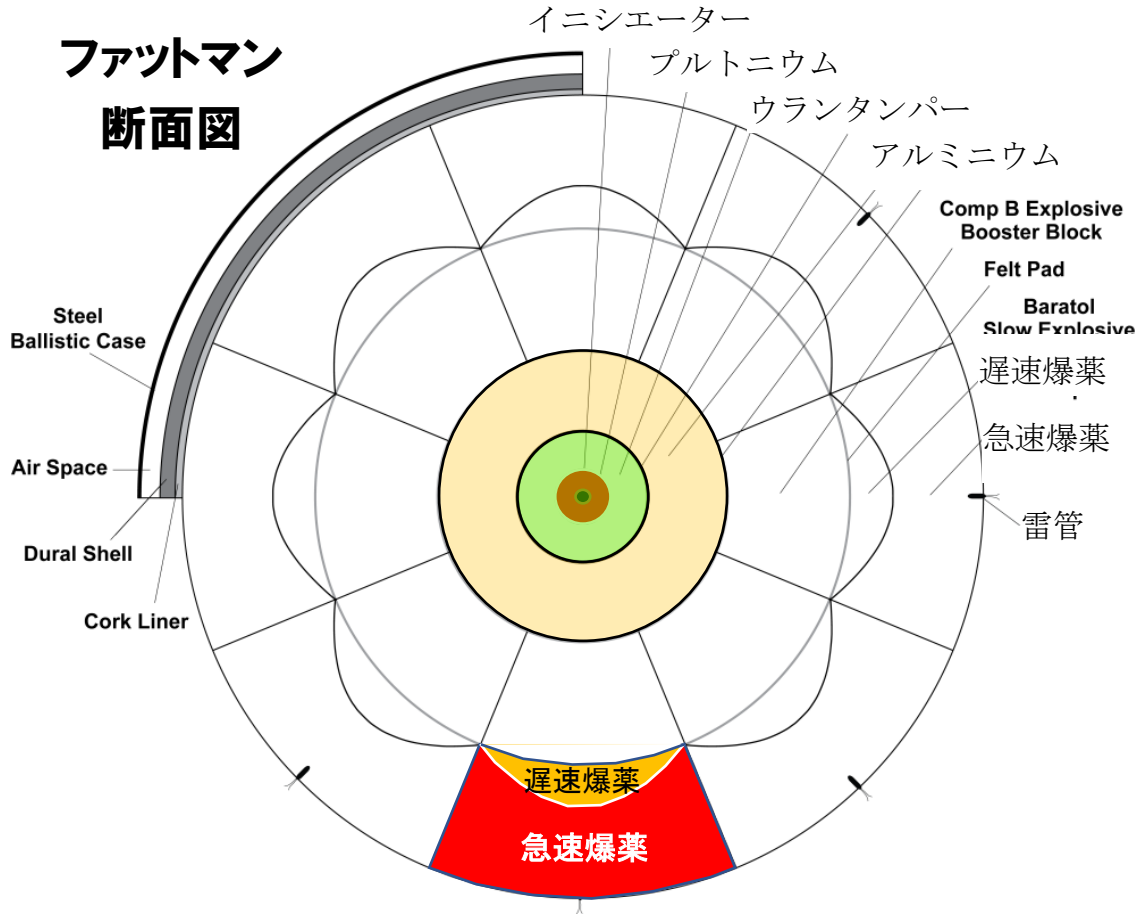
これで、良かれ悪しかれ、日本人の凄まじいあきらめない血筋が、欧米人に恐怖心を染み付けた。これについては、私はロンドンに赴任した時に、直にイギリス人から聞いたことである。が、先人たちが流した血を考えると、私は喜べなかった。英霊たちへの誇らしくも悲しい痛々しい気分は、戦争を知らない私でも永遠に消すことはできない。

<http://boisholz.club/bomb/atom-bomb-principle-and-construction/>



Fat Man was 60 inches in diameter, was 12 feet long, and weighed 10,300 lb.

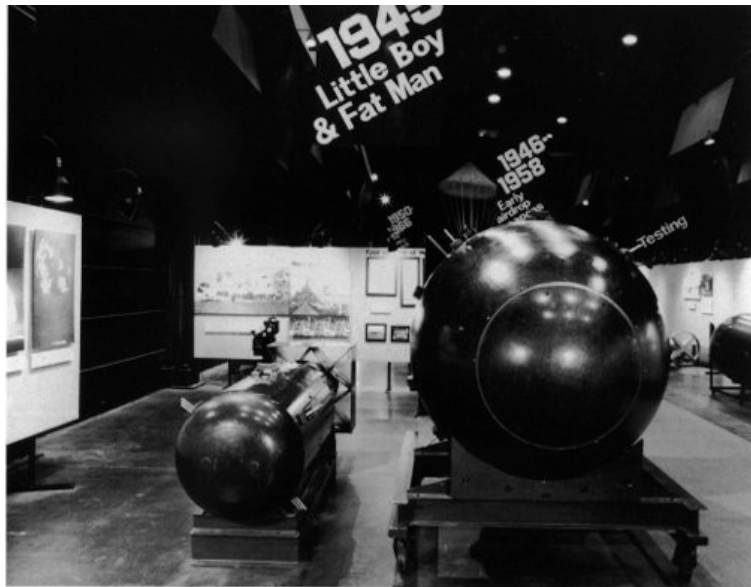
# ファットマン 断面図



<http://www.atomicheritage.org/history/little-boy-and-fat-man>



<http://nuclearweaponarchive.org/Usa/Med/Lbfm.html>



緒元	"Little Boy"		"Fat Man"	
幅	28 in.	0.71m	60.25 in.	1.47m
長さ	120 in.	2.94m	128 in.	3.12m
重量	8,900 lb.	4 トン	10,300 lb.	4.6 トン
威力	15~16 キロトン		21 キロトン	



## 映画「ピースメーカー」におけるプルトニウム核爆弾



<http://russia.iroirobest.com/category13/entry117.html>

最後に、どうしてソ連は大戦後即座に原爆から水爆へと、核開発が出来てしまったのか？という疑問が誰しもあるにちがいない。それは、ロスアラモスに参加したある米国の科学者（セオドア・ホール）がソ連の情報機関にロスアラモスのファットマン機密書類を全て流したからだと言われている。イギリス在住のその科学者は、日本のテレビ局のインタビューに、

「こんな恐ろしい武器が米国の独り占めになることで戦後の国際関係が米国一色になることは避けるべきと考えた。」

と、嘯（うそぶ）いたと聞く。

しかしながら、そのソ連が闇で、1960年代、新興の中国共産党などに流していくつもの貧乏な核保有国が出来てしまったことは、論外なのだろうか。13億～15億という膨大な人口を抱える中国共産党は、1971年の米国との国交回復で、その餌となった国連常任理事国になりふり構わずに加わった。つまり、第二次大戦の戦勝国側が常任理事国の第一条件だった。本来どおり台湾の蒋介石国民党が中国代表であったが、それを米国が押し潰して中国共産党を推薦するという餌だった。ユダヤ人であるキッシンジャー国務省長官のえげつなさが如実に現れた。それが、高度な国際感覚にあふれた代表的、知的アメリカ人という絹の衣に隠れていたから、おおかたの日本人インテリは褒めたたえた。しかしながら、こうして今の国際情勢を眺めてみると、なおさら、信義に篤いアルベルトとは正反対のユダヤ人のえげつなさに唾棄したくなるのは私だけであろうか。

現在、党员9千万を擁する中国共産党は、貧困にあえぐ10億以上の民を放置して、いまでも成金富豪のように振る舞う浅ましきには、開いた口が塞がらない。そんな民族に1960年代に核武装を与えてしまったのは、まさに、ソ連の暗い戦略だったことは現実である。核保有国が増えたことにより、余計に国際情勢をクリティカルにしたことは反省もしないのだろう。現在のNK王朝にも、ロシア（ソ連）が核武装を仕込んだことは明白であるが、素知らぬ顔で「平和的な話し合いが一番だ」と、ヌケヌケと言う神経は私たち日本人には真似できない。よくも、平和を乱してきた連中が「平和的」と言ったものである。

## 一般相対性理論

人が大なり小なり有名になるのには必ずPRしてくれる立役者がいるものである。私のささやかな人生でもそんな友人達がいた。思い出すたびにこそばゆい。

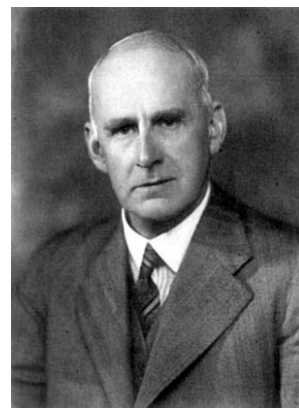
アルベルトの場合は、最大の功労者が、当時の英国ケンブリッジ天文台台長のアーサー・エディントン（1882 - 1944）であった。彼は1915年に第5回に掲げたオランダのド・ジッターからの郵送で一般相対論の論文を手にとってから、異常な興味を示して猛烈に吸収した。第一次大戦（1914～1918）の最中だったから、スイス経由であつたらしい。まもなくして、アルベルトによる一般相対論の検証のための観測推奨に応じたエディントンは、1919年にアフリカ西海岸沿いのプリンシベ島まで膨大な観測機器を積んで航海し、日食観測を行った。その結果、見事にアルベルトの予測どおり太陽の重力場に影響された星の光の曲折角度を測定できたのである。

この話だけで、エディントンは科学の歴史に勇名を馳せた。同時に、第一次大戦後まもなくのことでもあり、イギリスからすれば敵国のドイツの科学者に協力したことになった。しかしながら、アルベルトとエディントンのような宇宙まで視野が広がった科学者からすれば、無謀で無益で、無数の人命を犠牲にする凄惨な戦争については忘却できないこととしても、それを越えたお互いの友情に亀裂を生じさせなかった。それどころか、相互に敬愛する関係が築かれたという。一方、アルベルトは、ドイツでの友人かつ支援者でもあった化学者フリッツ・ハーバー（1868 - 1934）が毒ガス開発を始めたことに深く胸を痛めたようでもあった。

戦争と科学・技術の発展は比例すると言われて久しい。出来るなら、アルベルトは戦争に巻き込まれたくないという気持ちが強かったときく。それと、ユダヤ人迫害から絶滅へと加速がついていくナチス・ドイツに対して命の危険まで覚え、1933年にはアメリカに亡命した。またしても、原爆開発という悪魔のプロジェクトに巻き込まれる惧れが嵩じてきてしまった。プリンストン高等研究所の教授として招かれたというアメリカ合衆国への大恩と、科学者の良心に挟まれて苛まれたにちがいない。かろうじて白羽の矢は飛んでこなかったが。

一般相対性理論については、これまで第3回から何度も触れてきた。この広い宇宙に適用されるとは、当時の科学者の誰が予想できたであろうか。余りにも広く底深い。数学者たちも眼を剥いた。特殊相対論では、慣性系の時空構造に対してロシアの数学者ミンコフスキー（1864 - 1909）により「ミンコフスキー空間」として精密な数学的基礎が与えられた。逆に、余り応用されなかった非ユークリッドの「リーマン幾何」については、特殊相対論公表後に、アルベルトが苦闘の末に学び取って一般相対論の方程式に採用した。だから、一般相対論完

アーサー・エディントン



[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Studying\\_the\\_stars\\_testing\\_relativity\\_Sir\\_Arthur\\_Eddington](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Studying_the_stars_testing_relativity_Sir_Arthur_Eddington)

アルベルトとエディントン



[http://www.fivemins.com/freedom\\_of\\_inquiry/index.html](http://www.fivemins.com/freedom_of_inquiry/index.html)



成までに10年もかかってしまった大きな一因と言われている。その公表後、とたんに数学者たちも奮い立った。戦後ではあるが、我が国随一の数学者矢野健太郎（1912 - 1993）は、招請に応じてプリンストン高等研究所に研究留学してアルベルトに学び、リーマン幾何におけるテンソル演算の研鑽を深めたようである。物理学と数学の相互刺激は、自然科学における永遠の課題でもある。その代表的な例が特殊相対論と一般相対論であることは間違いない。

## 思考実験

アルベルトの桁外れの思考は、ついに重力を捉えることになった。それは、特殊相対論が実を結んだ1905年から始まる。彼は、常套の思考実験に落ち込んだ。しかし、今度は、引くに引けない土壇場に踏み込んだのである。

重力については、ニュートンがほとんど解明してしまったから、地球上のすべての物理学者や天文学者は、ニュートン力学を修めてバイブルのように崇めてきている。しかも、惑星軌道計算も、ハレーの彗星軌道の計算もピタリと予言できるほど克明であった。

ところが、27歳のアルベルトの頭には、慣性系の相対論の次は「加速系の時空」を造り上げたいという執念みたいな志望が消えていない。加速系の場合、その最たるものとして重力による加速落下現象があり、ガリレオの実験により、それは重さという質量に影響されない。

この不思議さ、というよりもアルベルトだから気付いた。重量に関係しないということは、

### 「何が加速を付けるのか」

ニュートンは、万有引力としてしまったが、本当だろうか？ デカルト（1596 - 1650）によれば、何もない空間で力が作用することについて、ニュートン（1642 - 1727）は説明できていない、と批判したという。正確には、時代が違うから、デカルトの予言にニュートンは答え切れなかった、というべきである。

ガリレオの言ったとおり、大気中でなく真空中であれば、綿も鉛玉も同じ加速度で落ちることが、アルベルトを困らしたのであろう。行きつけのカフェで彼は憑かれたように放心していた。「どうして落ちるのか？」ということしか頭になかった。そして、窓の外を見ながら、5階から飛び降りる人を想像してしまった。

途端に、ロープが切られたエレベーターの中の人はどうなるのか、という思考実験に夢中になった。この話は有名すぎるが、現代の私たちには簡単すぎる。すなわち自由落下のエレベーターの中の人「無重力」になることを知っているから。理工学部の大学生なら、「そりゃ、宇宙ステーションの中も無重力になるさ。だって、それも自由落下しているのだから。」と事も無げに答える。でも、そう答えるだけでは、私たちも大学生も秀才にさえ、決してなれない。

アルベルトは考えた。何千 km も離れたところで、同じく自由落下のエレベーターの中の人を観測した。その結果、閃いた。彼らは、なんと地球の中心に向かって落ちていくではないか。

この思考実験が、時空と重力との関係の解明の手掛かりとなり、アルベルトは新たな理論の核心に迫ることができたのである。

エレベーターのロープが切られた場合：  
エレベーターも乗っている人も自由落下するから、エレベーター内は無重力になる。



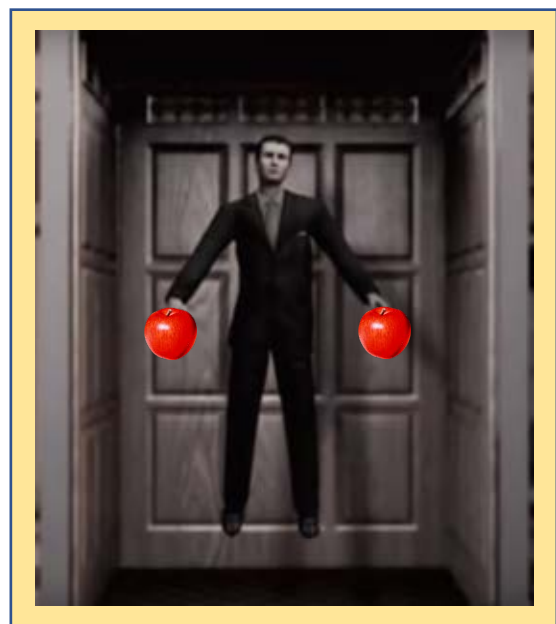
何千 km も離れたところで、同じく自由落下のエレベーターの中の人を観測すると？



この思考実験は、ニュートン誌の記事によると、もっと簡単になる。

『百 km 以上も深くて、長い時間、自由落下するエレベーターの中で無重力の人が、リンゴを二つ、左右の手に一個ずつ持っていた。これらを手から離したら、二つのリンゴはエレベーターの中でどのような運動をするか？』

これが一目で解けたら、あなたはきっと秀才ぐらいにはなれる。



## 等価原理

次の問題は、慣性力である。この力は、重力と違うのか同じなのだろうか。

私たちは、例えば岩石の重量を一概に「重さ」というが、持ち上げる力と引き摺る力に違いがないものと思っている。アルベルトの考えは違う。一歩進めるのである。つまり、それらは等価であるとしてしまう。

### 重力質量 = 慣性質量

これを「等価原理」と呼んだ。

したがって、惑星が太陽を周回するときに、ニュートン力学は勝手に太陽の引力（重力）が惑星の公転による遠心力（慣性力）と釣り合うとして、つまり同じ力として惑星の運動方程式を決め付けてきたのである。このケースでは、宇宙の摂理をスキップした、いや、気付かなかった秀才の秀才たる所以が暴露している。

現在では、無重力の宇宙で地球上と同じ重力を生み出すため、丸い蛍光灯みたいな大きな宇宙ステーションを作って回すと丸い蛍光灯内部の外側に重力場ができることが判ってきている。これこそ、回転による遠心力（慣性）によって疑似重力が生じ、等価原理が見事に再現される。映画「2001年宇宙の旅」を観ればわかる。

<https://www.amazon.co.jp/>



等価原理により、アルベルトは「重力のみ」に着目すれば、彼の相対性理論を一般化できることを確認したのであった。

## 一般相対論方程式

先に掲げた自由落下エレベーター内の二つのリングの運動は、お互いに近づくというのが正解である。このことで、自由落下エレベーター内の空間が曲がっていることに気付いた。それは、地球の重力場が空間（時空）を、地球中心に向かって円錐状に歪めているのである。飛躍すれば、それは二つのリングに対して

### 『力が働いている』

ことを意味する。すなわち、時空の歪み、曲率が重力を生起させていることをつきとめた。

この考えにより、なんと、デカルトが言っていたエーテルではなく、**時空の歪み**が取って代わることになった。更に、ニュートンが及ばなかった重力の遠隔作用の謎が解けたのである。アルベルトが27歳の頃であった。

ただし、その一般相対論の数学的建設工事は難航を極めた。アルベルトが振り返って言ったそうだ。

「重力の理論の建設は、特殊相対性理論が完成するとすぐとりかかった課題であった。しかし、一般相対性理論に長く手間取ったのは、最初は物理的な考察だけで片付くと思っていた重力場に、いままで使ったことのない幾何学的な表現を導入しなければならなかったからである。特に、ミンコフスキーが導いた四次元空間の幾何学による特殊相対性理論にすらよくなじむことの出来なかった自分にとって、ガウスやリーマンが作り上げていた新しい幾何学をマスターすることは容易な技ではなかったからである。」

中村誠太郎著「20世紀物理はアインシュタインとともに」より

そして、友人の数学者グロスマンにリーマン幾何を学び、助言を受けたという。彼はマルセル・グロスマン（Marcel Grossmann, 1878 - 1936）と言い、ハンガリーのブダペスト出身の数学者。アルベルトのチューリッヒ工科大学同級生として知られる。

第5回に掲げたように、ようやく、空間の歪みを表現した一般相対論方程式を1915年に完成させた。第一次大戦が始まって、その嵐の最中である。

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

1915年秋、プロイセン科学アカデミーにおいて講演、発表した。

この時、既にこの講演に備えていたドイツの大数学者ダフィット・ヒルベルト（David Hilbert, 1862 - 1943）がいた。「現代数学の父」と呼ばれる。ユークリッド空間の概念を一般化した**ヒルベルト空間**は彼の研究成果である。そのヒルベルトが、プロイセン科学アカデミーに先立つ試行的なゲッチンゲン大学でのアルベルトの講演を傍聴し、アルベルト理論の欠陥を見抜いていた。同様に、本人アルベルトも気付いており、その欠陥の修正に集中して

検討した。なんと 1912 年の最初の方程式を思い出して再検討した結果、問題が解決された。それがニュートン力学では説明できない「水星軌道の近日点移動問題」であらわになるのであるが、短期間で己の見直した方程式によって解消できた。

ヒルベルトは、手ぐすね引いて 1915 年 11 月のプロイセン科学アカデミーにおけるアルベルトの講演に臨んだ。出来るなら彼から斬新性にあふれた一般相対論をもぎ取りたいと。だが、ヒルベルトはアルベルトの講演においては一般相対論の欠陥がきれいに修正されて完璧であったから率直に脱帽したという。おおかたのインテリ聴衆はアルベルトの革新性、つまり誰もが信じてきたバイブルのようなニュートン力学の否定に対して消化不良に陥り、かなりの不満をあらわしたが、ヒルベルトは一声でそれらを鎮めてしまったのである。

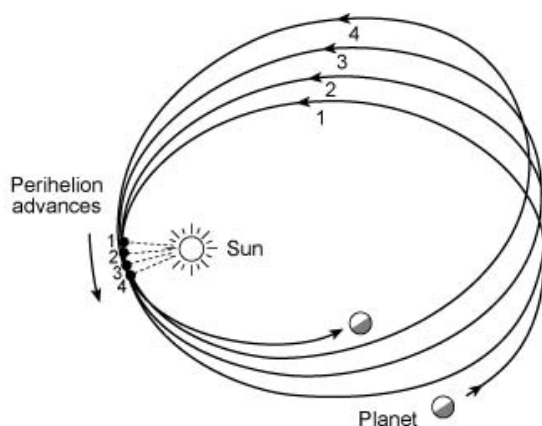
しかしながら、アルベルトはやはり実証がなければ自分の新理論は信用されないことを痛感したのである。



## 水星の近日点移動

水星は、太陽に一番近い所を回っている。地球の内周になるため、金星と同じく夜空では見えない。かろうじて朝方の東方か夕方の西方にしか観測することができない。18 世紀頃には、そのわずかな時間帯でも天文学者が水星の軌道観測に興味を寄せた。

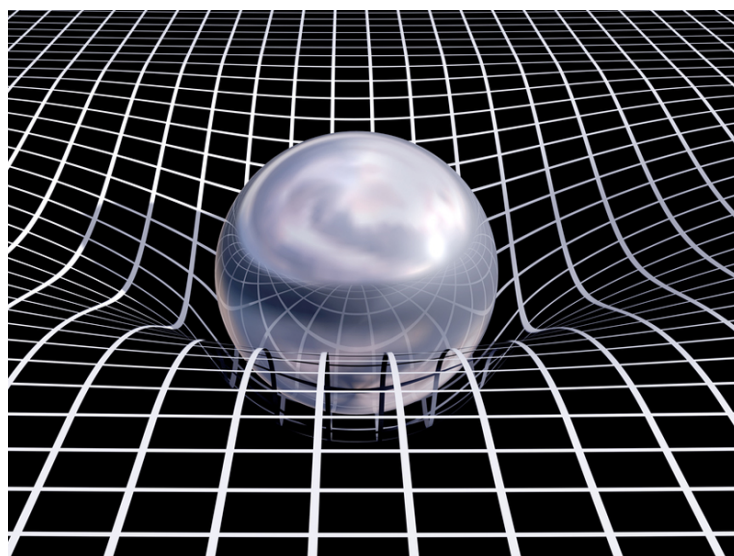
ところが、楕円軌道する水星の近日点が少しずつ移動していることが、判明した。望遠鏡が発達すると、100 年間でおよそ「574 秒」(1 秒 = 1/3600 度) ほどズレているではないか。



<https://briankoberlein.com/2013/08/31/span-of-a-heartbeat/>

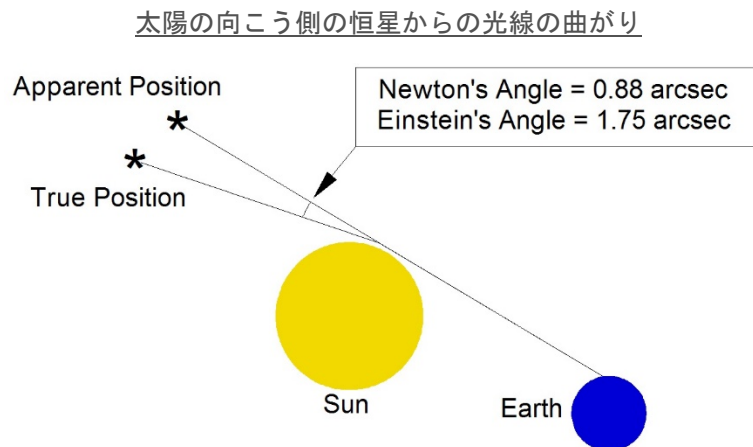
18 世紀当時、万能だったニュートン力学により、かなり難しい三体問題（太陽～水星～金星）として、金星や地球による引力による影響でズレの計算をしたところ、「531 秒」という値が得られた。しかし、その観測値と計算値の差「**574 - 531 = 43 秒**」はどうしても縮めることが出来なかった。この問題は 100 年ほど続いたらしい。

それを、アルベルトが一般相対論発表のときに、その方程式の例題的な解により鮮やかに証明して聴衆に披露したのであった。すなわち、一般相対性理論：太陽の重力で空間が歪むことにより、その差が生じるのである。



<http://discovermagazine.com/2015/april/12-putting-relativity-to-the-test>

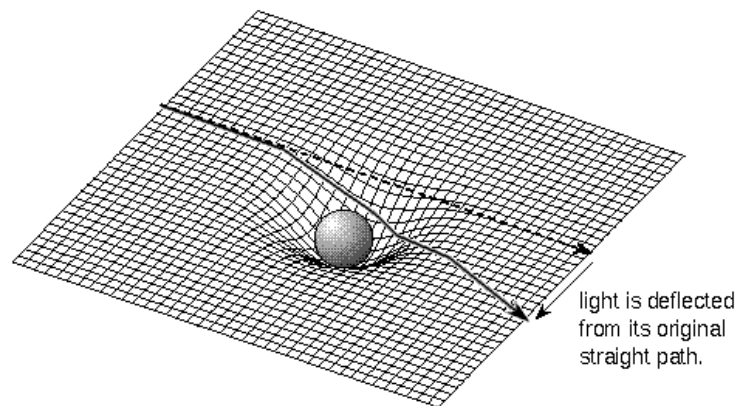
## エディントン



<http://blogs.discovermagazine.com/crux/2017/05/05/solar-eclipse-einstein-relativity/#.WbXl3LpuLIU>

1911年、一般相対論完成の4年前である。アルベルトは、己の理論は机上の空論として扱われ易いことが気になってしょうがなかった。このため、理論の実証が必須であると観念し、学界情報誌にPR記事を載せ、天文学者に呼び掛けた。

- (1) その実証方法とは、皆既日食時に太陽の後方にある星々を観測して星の光線が太陽近傍で曲がる現象を写真に撮ることである。アルベルトは既に、己の方程式の解により曲がり角度を計算していた。



- (2) 1912年、誰からも注目されなかったが、一人だけ反応した。彼はフロイントリッヒというベルリンの若い天文台の観測助手であり、その熱心さにほだされた。アルベルトは彼が天文台の上司から反対されても名乗り出たことから、可能なかぎり支援した。
- (3) そのフロイントリッヒは、協力者が一人も出てこないヨーロッパで募るのは諦めて、遠くのアメリカ西海岸のリック天文台の天文学者ウィリアム・キャンベル(1862 - 1938)に手紙を書いたところ、潔くこれを受けてくれた。キャンベルは、日食の観測では開拓者であった。それぞれ、第一次大戦前夜、1914年、当時の日食観測に絶好なクリミア半

島に出かけたが、二人ともロシア兵に観測機器も採り上げられて追い返され、失敗した。これを聞いたアルベルトは落胆したという。

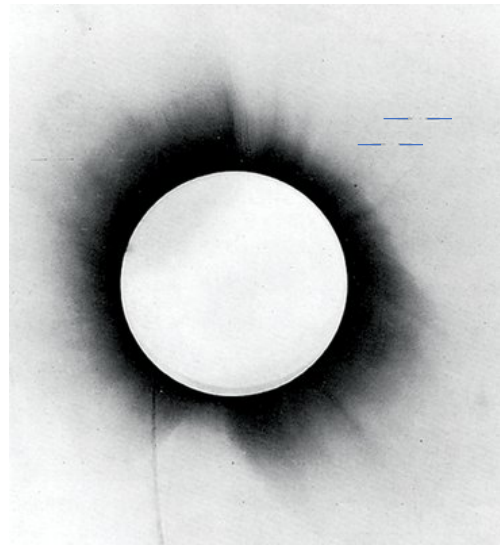
- (4) また、1915年は第一次大戦の真ただ中にあり、米国も参戦してきた。これを目の当たりにしたアルベルトの心は沈んだ。上司であるフリッツ・ハーバーはユダヤ人でありながら、キリスト教に改宗して、毒ガスの軍事研究に没頭した。アルベルトは戦争を心から拒否したが、大きな流れには逆らえなかった。孤独になったが、一般相対論の数式の再検討を始めた。そして、プロイセン科学アカデミーにおける講演に招待されて、ドイツの第一線級の科学者を始めとする教職者や学生が集まってくる。ここで、既に述べたとおり、聴衆の前でヒルベルトとの対決になったが、これを見事にクリアした。
- (5) そして、1916年、オランダのド・ジッター経由でアルベルトの一般相対論の論文を手にしたイギリスの天文学者がいた。彼こそ、アーサー・エディントン、ケンブリッジ天文台の台長であった。彼は一般相対論に夢中になった。さらに、アルベルトの信望者になったと言ってよい。アルベルトの日食観測の勸奨に応じるべきと観念した。さりながら、第一次大戦の最中にあり、軍の取締りはより厳しくなっていた。
- (6) 一方、熱心な米国のキャンベルは、1918年の皆既日食がワシントン州を通過することを知ったから、その写真撮影に再挑戦した。ただし、一張羅の望遠鏡とカメラはロシア軍に没収されたので、かき集めの劣悪品で備えた。その結果、曇天が僅かに晴れた瞬間をとらえて写真撮影に成功し、友人の天文学者カーティスに星々の位置の確定を依頼した。カーティスとは、第4回で述べたシャプレー対カーティス論争の「グレート・ディベート」で有名になった天文学者である。その彼が、写真乾板に移っていた星々の位置を克明に測ったが、太陽重力による時空の曲がりで起きる「ズレ」が見い出せなかった。品質の良くない望遠鏡のせいかもしれない。これではアルベルト理論の惨敗になる。ところが、キャンベルの鉄則であった「他の天文学者によるクロスチェック」に拘ったから、彼は測定結果を発表しなかった。アルベルトの予測値は微小で **1.75 秒角** だった。
- (7) 1919年、ついにアーサー・エディントンが、私財をはたいて観測機器を積んでアフリカ西海岸のプリンシベ島まで航海した。たった皆既日食の観測だけのために。相当の財がなければ出来ない観測でもあった。熱帯のジャングルを切り開いて仮設の観測所を設け、雨雲がたちこめて、とても観測に適する天候ではなかったが、それでも日食当日には雨雲が切れ目をみせた。その数分間の待ちわびたすき間で、数十枚の乾板に撮ることができたのである。明瞭なのは、そのうち数枚しかなかった。

その出来事は、1919年5月29日であった。

- (8) エディントンは、現地ですぐに、蚊と闘いながら撮った乾板から星のズレを見つける難行が始まったが、一カ月もかかった。僅かな曲折しかない。それでも、何とかデータを採ることができた。そして、数か月後にロンドンの王立天文学会の1919年11月の講演で発表することになった。キャンベルもその学会で自分のアルベルト理論を否定する観測結果を発表することになったが、事前に、航海中のエディントンから観測成功の電報が入った。このため、米国での天文学誌への発表原稿を差し止めたのである。

(9) 王立天文学会におけるエディントン、王立天文学会の創立者であるニュートンの肖像にむかって「あなたの宇宙を覆すことをどうぞお許してください。」と頭を下げたという。そして、アルベルトの一般相対論の要点を解説した後、ヒヤデス星団の **1.75 秒角** のズレ観測結果を発表して、アルベルトの予測を見事に裏付けた。イギリス中から学者連が集まった。マスコミも沸いた。ほとんどのイギリス人が、見知らぬアルベルトの存在に驚いた。

A negative photograph of the 1919 eclipse taken from Sir Arthur Eddington's expedition report



<https://www.earthmagazine.org/article/benchmarks-may-29-1919-solar-eclipse-proves-relativity>

[筆者註] エディントン観測隊は二チームに分かれ、それぞれ1.61秒角と1.98秒角のズレを確認した。

アルベルトによる予測	1.75 秒	< 誤差 >
プリンシペ隊の観測結果	1.61 秒	- 8%
シブラル隊の観測結果	1.98 秒	+ 13%

しかしながら、キャンベルの否定的な観測データがどこで漏れたのか知らないが、批判的学者やメディアには、まだ、疑心が解消してない、一般相対論が完全に認められなかった。アルベルトは心から喜べなかったのである。

(10) このため、1922年9月のオーストラリア西部で起きる皆既日食が目標となって、観測ワールドカップのレースが始まった。米国、イギリス、インド、オーストラリア、カナダからの観測チームが、さらにあのフロイントリッヒも参加した。あたかも現在の太陽電池モーター・カーのレースのようだったかもしれない。結果、米国のキャンベル部隊が最新観測機器を揃えて、天候にも恵まれ大成功を修めた。測定結果はアルベルトの予測値の誤差範囲内(多分±1/100)で測定できた。キャンベルは即座にアルベルトに成功電報を打ったのだ。「エディントンの観測結果は正しかった」と。これにより、アルベルトの脳内から暗雲が完璧に吹き飛ばされたのであった。

(11) 『時空が重力場によって曲げられる』という信じられない現象が、口うるさい科学者達も含めて認めざるを得なかった。

以上は、ヒストリー・チャンネル「アインシュタインと皆既日食」(2009.12.19)より要約・補完。

**ついに、ニュートン力学は旧約聖書になってしまった。**

その後のエディントンは、まさに一般相対論の信者以上の科学者になって、ブラックホールの「エディントン限界」など、著しい業績を残した。

なお、アルベルトの一般相対論方程式から、導出計算は私には不可能でも、ニュートン近似として  $F=ma$  が導かれる。

当然ながら、特殊相対論と同じく、旧理論が新理論に含まれるアッパー・コンパチブルも達成されている。一方、キリスト教の世界では、旧約聖書と新約聖書との奇妙な関係はそこまで配慮されてなかったことが、世界史を余計に複雑にしてきたのかもしれない。仏教やイスラム教も同じく、身勝手に宗派が生まれて対立し、宗教のふしだらさが露呈している。確固とした原典である方程式が無いからかもしれない。

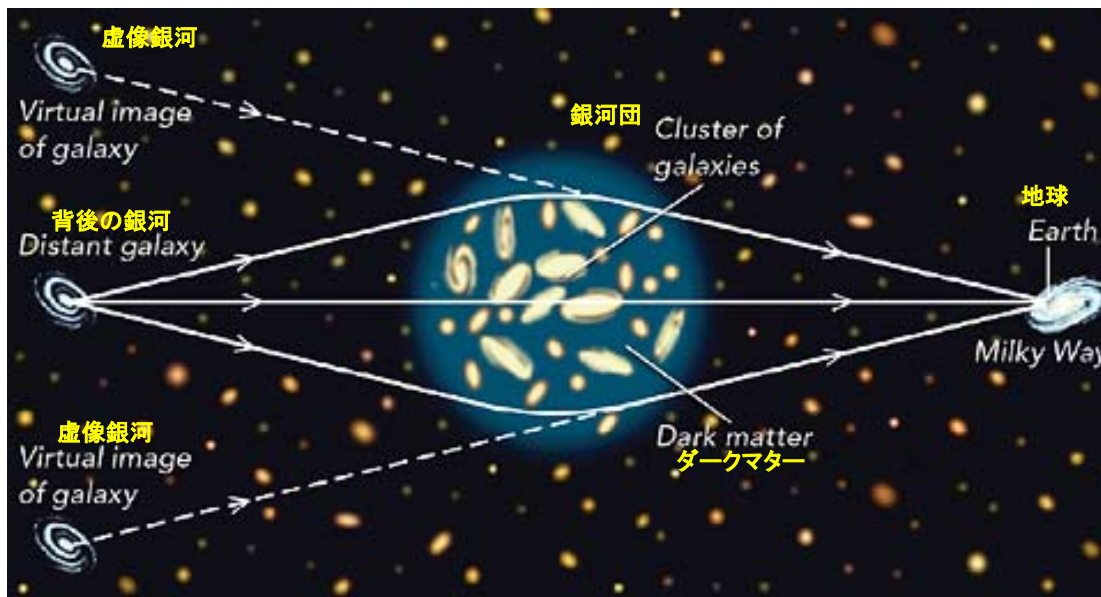


## 重力レンズ [再掲]

これは第4回「銀河」において既に掲げた重力場での光の屈折効果を拡大した一般相対論現象である。ダークマターの項であるが、引用すると次のとおり。

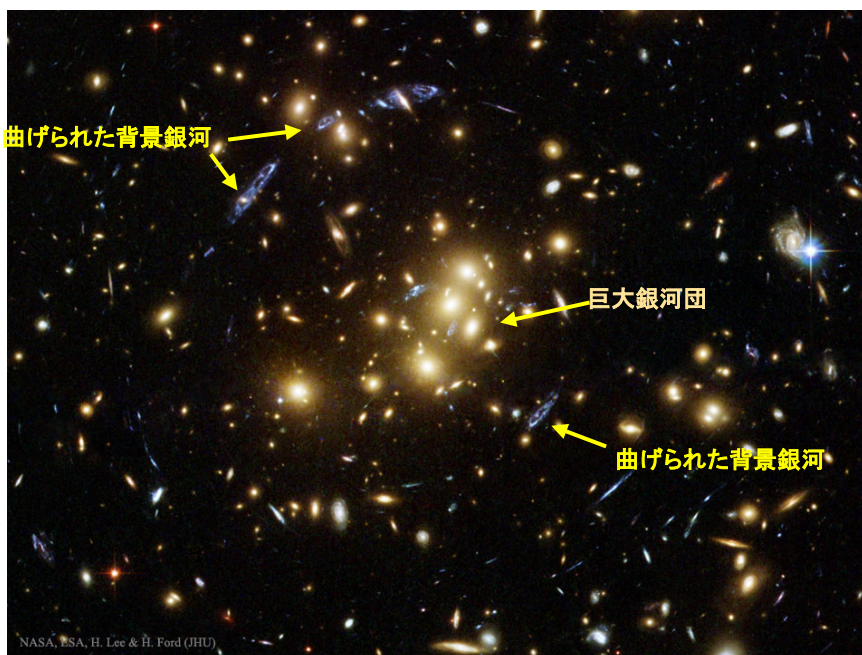
「ダークマターには重さがある」という1点に絞られ、アルベルトが予言した、太陽重力場で背景の恒星光が曲げられる現象を一般化した「重力レンズ効果」が俄に注目された。

### <再掲>重力レンズ効果



[http://www.naturalhistorymag.com/htmlsite/master.html?http://www.naturalhistorymag.com/htmlsite/0907/0907\\_feature.html](http://www.naturalhistorymag.com/htmlsite/master.html?http://www.naturalhistorymag.com/htmlsite/0907/0907_feature.html)

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

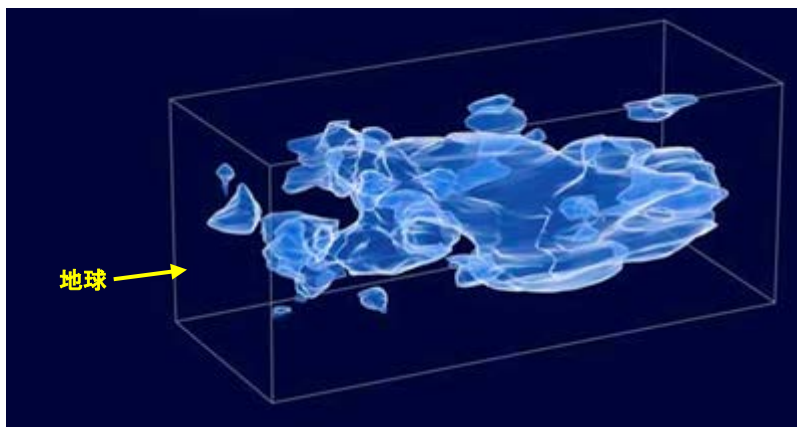


不思議の国のアリスにおけるチェシャ猫 <<https://apod.nasa.gov/apod/archivepix.html>>



なんと、この一般相対論予言の応用は、1990年代頃からであり、アルベルト逝去後30年ほど経っている。予言は死後にこそ蘇る、ということに改めて思い知らされる。

とにかく、太陽近傍を通過する星の光の屈折どころではない。NASAやキャルテックの宇宙物理学者たちは、上に掲げた本物の画像から、一般相対論方程式によって見えないダークマターのおぼろげな姿を三次元で捉えたのである。





## ビッグバン [再掲]

冒頭のレビューで述べたように、ビッグバン発祥は、ジョルジュ・ルメートルが一般相対論を紐解いたことに始まる。アルベルトの画期的な理論が生まれた年が1915年であり、ルメートルがその宇宙解を求めたのが1927年頃であるから、かなり早い。ところが、ガモフらに予測されたCMBは、ようやく21世紀になってからWMAP等で克明に観測できたのである。これほど長くかかった予言の証明は余りない。この予言はアルベルト本人でなく一般相対論の信望者たちによるものであった。観測技術のめざましい発達によって成し得たことでもある。

ビッグバンは、アルベルトの「平衡宇宙」という信念に逆らうものであり、ハッブルの「銀河の後退」という観測に見えてからは、あっさりと、膨張宇宙論には口をはさまずに、避けてとおるようになったという。

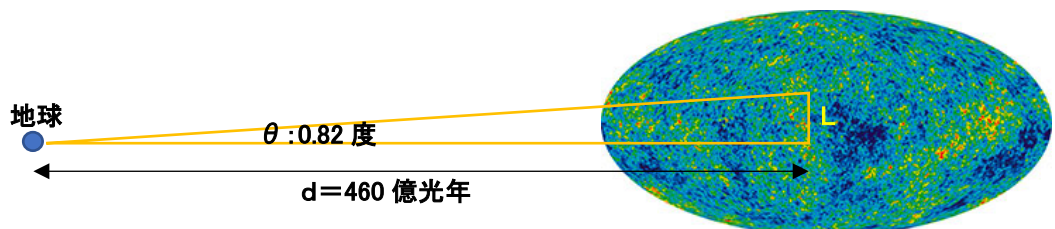
## 宇宙の平坦性 [再掲]

宇宙の平坦性（ $\Omega=1.003\pm 0.004$ ）こそ、正に一般相対論の大前提である。

実際それが、WMAP計測データから解析されたパワースペクトルに基づいてコスミック三角法が適用できた。インフレーションのときにできた量子揺らぎのさざ波から、38万年間に伝わった距離 $L$ が求まる。我々が観測できるのは見込み角度： $\theta$ である。

これらの論理的過程で、CMBまでの距離 $d$ が460億光年と計算。

次いで、宇宙年齢が $137\pm 1$ 億年と求められた。



### 宇宙項と膨張宇宙 [再掲]

第5回で述べたように、膨張宇宙の現象の解明は、もともと、1922年に一般相対論の宇宙解を求めたロシアのフリードマンに依るところが大きい。1917年にアルベルトが発表した「宇宙方程式」に宇宙項が付加されたが、フリードマンはこの解を得た。同時に原典方程式でも、宇宙の曲率が正か負かで、減退宇宙か膨張宇宙かに分かれることを付き止めた。

$$\text{原典宇宙方程式：} \quad R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

$$\text{修正宇宙方程式：} \quad R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

ラムダ項=宇宙項

アルベルトとフリードマンは、書簡を通じて激論になった。アルベルトの平衡宇宙観にそぐわない解が出たからである。そして、ついに認めなかった。しかしながら、1980年代になると様々な観測や宇宙論が展開されると、フリードマンの解析は尊重され始めたのだから、歴史とは皮肉なものである。

### ハッブルの法則 [再掲]

次に掲げるフリードマン方程式から、ハッブルの法則が導出されるようだ。

$\frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{K}{a^2} - \frac{\lambda}{3} = \frac{8\pi G}{3c^4}\epsilon$	: フリードマン方程式
$\dot{\epsilon} = -3\frac{\dot{a}}{a}(\epsilon + p)$	: 一般相対論におけるエネルギー保存則

これらから、条件設定のうえ幾段もの計算を経て、

$$\mathbf{v} = H_0 \mathbf{d} \quad [\mathbf{v} : \text{後退速度、} \mathbf{d} : \text{銀河までの距離}] \text{ が次のように導かれるという。}$$

$$H = \frac{\dot{a}}{a} = \frac{\dot{r}}{r} \quad \longrightarrow \quad \dot{r} = H r$$

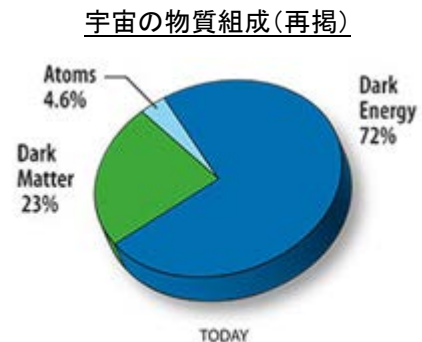
ここで、 $r$  は距離を示し、左辺  $r$  ドットは  $r$  の時間微分で速度に対応する。

## ダークエネルギー [再掲]

前回掲げたように、1990年代にアメリカのパールムッターとオーストラリアのシュミットが、共同して膨張宇宙の観測に挑んだ。その結果、「加速膨張」しているデータが得られたのである。それはIa型超新星の距離観測によるもので、その超新星が遠くになればなるほど、いや赤方偏移が大きくなればなるほど距離が伸びていることが判明した。この結果、この広い宇宙では、宇宙項がある一般相対論方程式が妥当であるということになった。そして、その宇宙項に関する物質をダークエネルギーと称した。

この宇宙項はアルベルトがハッブルに会った直後に消し去ったものであったが、現代の宇宙物理学者たちに復活させられたのだから、理論の優劣とは何を指すのだろうか。

なお、 $E=mc^2$ によりエネルギーは物質mに変換され、その逆もまた真なり、ということで、次のとおり、この広い宇宙の物質組成が最終的にWMAPによる観測とデータの数理計算により右のような割合になった。(第5回掲載)



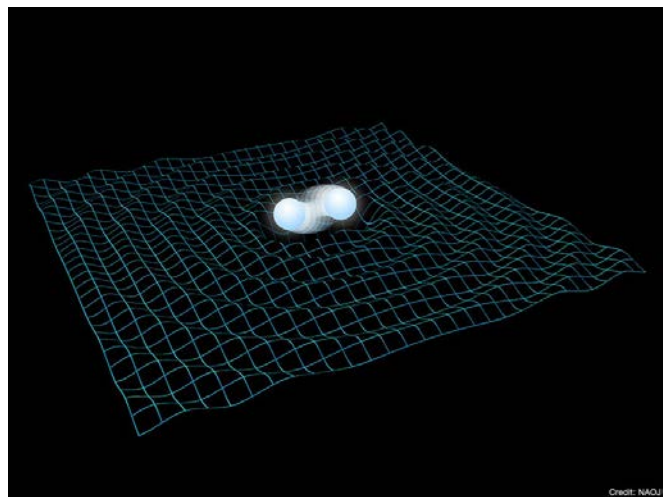
## 重力波 [再掲]

現在、最先端の観測課題である。日本では運用開始が迫る KAGRA、米国では既に観測運用中の LIGO というプロジェクトが進行している。2015年に LIGO が初めて二つのブラックホールの合体による重力波検出が報告された。(追記参照)

これにより、アルベルトの予測のうち唯一の未解決問題が実証されたのである。

この広い宇宙では、連星系の中性子星が合体する時、あるいはブラックホールどうしが衝突する時が観測のタイミングとして期待されている。もっと斬新的なものとしては、CMB 自体に重力波が刻まれているのではないかと、WMAP 観測データの解析に没頭した小松英一郎という若い宇宙物理学者が言っている。しかし、まだ不明である。

連星中性子星から放出される重力波のイメージ図



<https://www.nao.ac.jp/news/topics/2015/20151116-kagra.html>

[追記] 米国のレーザー干渉計型重力波検出器 LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) により、連星ブラックホールの合体による重力波が捉えられたとして、2017年度ノーベル物理学賞が米国の物理学者三人：バリー・バリッシュ他に決まった。受賞対象となったのは、次の LIGO の観測結果である。

LIGO は、3,000km 離れた米ルイジアナ州とワシントン州 (西海岸) に 2 基設置されている。これらにおいて 2015 年 9 月 14 日に 0.007 秒の時間差で同じ波形の重力波が観測された。この重力波観測時間は 0.2 秒間であった。2017 年 1 月には三度目が検出され、ダメ押しとなったのである。

これは、三つの天文現象、

- ① 連星ブラックホールの合体
- ② 連星中性子星の合体
- ③ 超新星爆発

の可能性が予言されてきた。持続時間が一番短いのが①連星ブラックホール合体に当るそうだ。

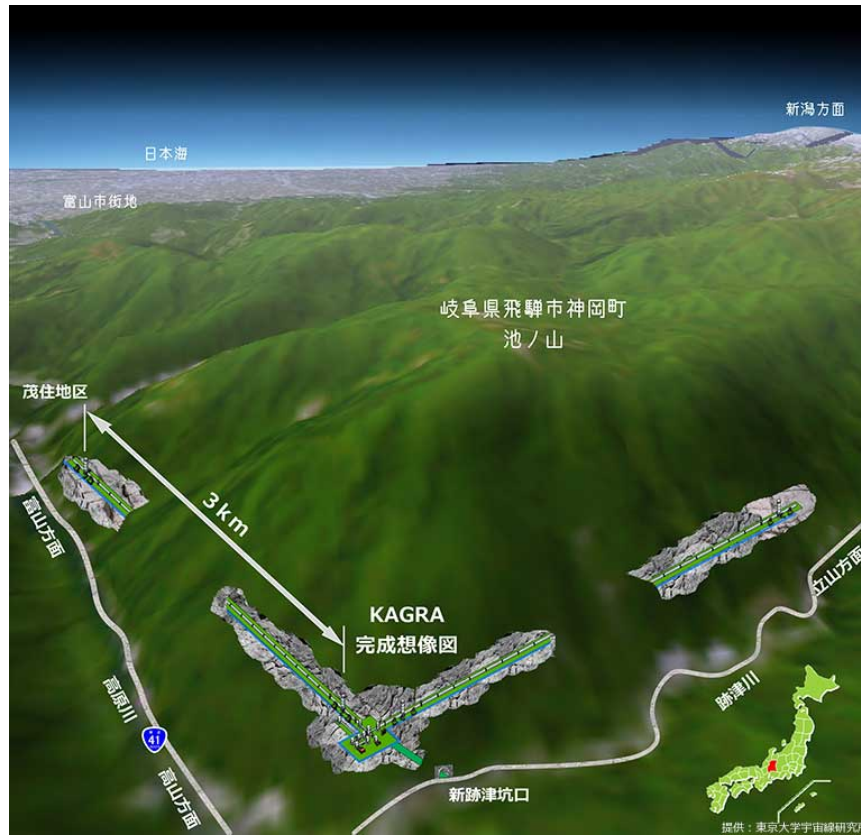
2017 年 1 月、LIGO がとらえた 3 回目の重力波は、過去 2 例と同様に 2 つのブラックホールが合体した現象で放出されたものだ。太陽の 19 倍と 32 倍の質量を持つ恒星質量ブラックホール (約 30 億光年先) が合体して太陽の 49 倍のブラックホールができ、太陽 2 個分の質量のエネルギーが重力波として放出されたと推測されている。過去 2 例の合体後のブラックホールの質量は太陽の 62 倍と 21 倍だったので、今回のものはちょうどその間になる。ただし、それらの現象が発生した方向・位置は特定できていない。一説によれば、月の視直径の 3,000 倍ほどのエリアまでは判明しているという。ブラックホールは光らないからであろう。

LIGO の複雑なレーザー光線感度強化装置 (鏡) を設計したのは山本博章氏 (カリフォルニア工科大学上級研究員) であるという。LIGO の心臓部となる十数枚の鏡群の反射により行われるが、この設計こそ LIGO の価値を左右するという。しかしながら、その集束を肉眼で見ながら行うことは困難を極める。彼は、それを可能とするコンピュータ・シミュレーション・プログラムを開発しており、それにより複雑極まりない鏡面収差と鏡群制御に応用したのである。その能力を探し当て、彼を招請したのがバリー・バリッシュ氏だった。

そして、2017 年 8 月 17 日に②の連星中性子星の合体が観測された。観測時間が 50 秒と長い。連星ブラックホールの場合は、最大で 10 秒ほどであると言われている。LIGO のほかに、同じ 8 月に運用開始されたばかりのイタリアの Virgo 観測装置でも LIGO の 7 時間後に捉えられ、3 点観測で方向を絞ることができた。この後、世界中の天文台で観測された結果、うみへび座の NGC4993 (1.3 億光年) で発生したことが明らかになった。中性子星合体では強烈なガンマ線バーストや可視光線も放射されるから見つけられたようである。また、r プロセス (第 3 回参照) による鉄より重い元素、すなわち金銀などが生成される過程も観測できそうだという。

### KAGRA(カゲラ)地下空洞の全体像。

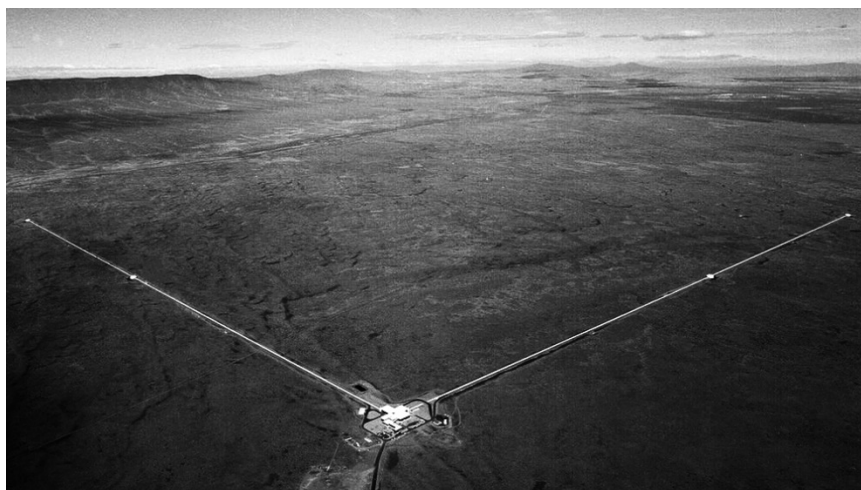
その中に、長さ3キロメートルの2本の腕を持つL字型構造をした重力波望遠鏡



<https://www.nao.ac.jp/news/topics/2015/20151116-kagra.html>

### LIGO (ライゴ)

Advanced Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (Advanced LIGO)



<https://www.quantamagazine.org/gravitational-waves-discovered-at-long-last-20160211/>



## 重力場における時間の遅れ

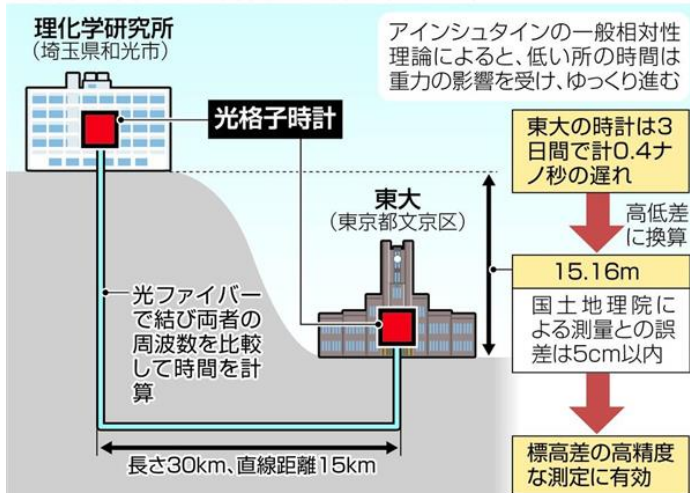
重力は本当に時空を歪めるのか？ 空間の歪曲については重力レンズで良く分かったが。

時間の遅れについても実験的に確認されたのだ。高さ 100 メートルのビルの屋上と地表とでは、重力はわずかに異なる。地球の重心に近い地表の方が重力が強く、そのぶんだけ時間が遅れる。1959 年および 1960 年には、放射性物質 を利用して高さ 22.5 メートルの塔の上と地上の「時間の遅れ」を検出する実験が行われ、高い精度で理論の実証がなされた。

また 1971 年には、ジャンボジェット機に原子時計を積みこんで地球を一周し「時間の遅れ」を確認する実験が行われた。この場合には、高速飛行にともなう特殊相対性理論の「時間の遅れ」効果と、重力の弱い高空を飛ぶことによる一般相対性理論の「時間の進み」効果があらわれる。測定の結果は誤差 1.6 パーセントの精度で理論を検証した。

最近、セシウム原子時計を超える超高精度の**光格子時計**による重力場の時間の遅れ計測実験が、東大と理化学研究所の間で行われた。時間の遅れから、たった 15 m の高低差を誤差 1 % 内で計測できたという。(下図) 地形の高低差の厳密計測の見通しが出来て、地震による地形の高低変化に応用されることになる。地形の緯度経度の変化は、これまでどおりスタティック GPS によることになるが、スタティック GPS でも不得手な高度差計測を補完できる。

### 光格子時計による高低差の測定(概念図)



<http://www.sankei.com/life/news/161024/lif1610240029-n1.html>

### 重力差による時間の遅れ

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{2gR}{c^2}}}$$

T = Time measured away from earth  
 $T_0$  = Time measured on earth  
 $g$  = Acceleration due to gravity  
 $R$  = Radius of the Earth  
 $c$  = Speed of Light

<http://www7b.biglobe.ne.jp/~kcy05t/general3.html>



## 重力場のねじれ：GP-B

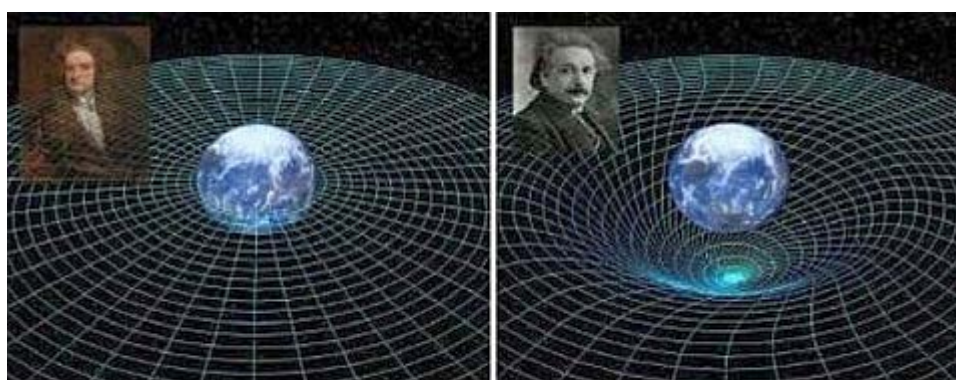
重力により時空が歪むのであれば、天体の自転により周囲の空間が振れるのではないかと考えられてきた。これはアルベルトが予言したのかどうかは解らない。1950年代末、レナード・シフ (Leonard Isaac Schiff, 1915-1971) は地球近傍で地球の自転による空間のねじれを検出する方法はないかと真剣かつ執拗に模索した。そして、NASAの実験衛星 Gravity Probe B (GP-B)がそれを観測するために2004年に打ち上げられた。何もそこまでする必要があるのか、アメリカ人物理学者の好奇心には限界がないことが判る。アルベルトの相対論の続びを見つけることではない。理論の真実への肉迫であろう。

実験衛星は、超高精度のジャイロ・スコープで「測地効果仮説」を検証する。すなわち、重力場の振れである。GP-Bには恒星の方向を測る光学機器「スター・トラッカー」を搭載。上空約650キロの極軌道(南北周回)において、機器の一端をペガサス座の連星「IM ペガシ (IM Pegasi)」に向け続けたのである。



<http://www.yorku.ca/bartel/guidestar/>

NASAの発表によると、遠方の星 (IM Pegasi) が見える方角が、**1年に9万分の1度**ほどの割合で変化していた。この変化は、地球の自転で発生する時空の渦の効果として理論が予言する量と一致し、また地球の質量による時空の歪みによる方角の変化も、理論の予言どおり観測できた。



Newton's fixed space

Einstein's flexible space-time

<http://blog.goo.ne.jp/ktonegaw/e/62901739c9bca66e9579dbfb749a3707>

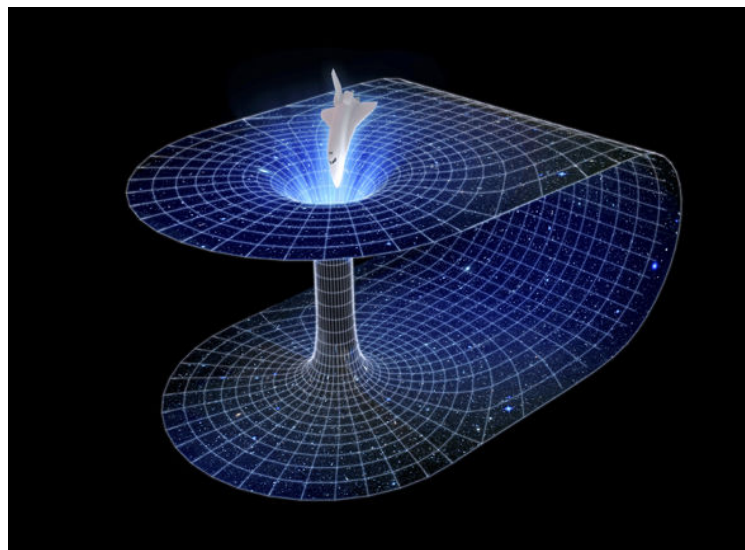
## ワームホール

ワームホールとは、小さな芋虫（ワーム）が栗の実に開ける穴のことである。英語的には蛆虫も指すようである。深い傷口を放置すると膿んでハエがたかって卵を産み、蛆虫がわく。それらが膿みを餌として食べてくれるから、傷の自然治癒にもなるというが、そいつらが開ける穴のことでもある。

1935年、プリンストン高等研究所におけるアルベルトと研究生ローゼン（Nathan Rosen : 1909-1995）は、ブラックホールの研究から、異なる時空を結ぶトンネルを形成する可能性を数学的に発見した。当時、それは**アインシュタイン=ローゼン・ブリッジ**（Einstein-Rosen Bridge）として知られていたが、現実にはあり得ないものと考えられていた。後に、ブラックホールに対して、数学的には、その状況を反転したホワイトホールも仮想できるらしい。ブラックホールとホワイトホールを単純に結ぶワームホールと考えても良い。

ブラックホールは観測からほぼ存在が確認されつつあるが、ホワイトホールの存在を示唆する観測や事実は全くない。ブラックホール自体、特異点に近づくと物体には、この世のものとは思えないほどの強大な潮汐力が高低差で鋭敏に強力に働き、スパゲティのように引きちぎられる。

## Wormhole



<http://www.express.co.uk/news/science/819741/Wormholes-in-Milky-Way-galaxy-interstellar>

潮汐力とは、地球に働く月の重力の違いにより生じる力が原点である。つまり、月に面した側と裏側が離れているから、あたかも「月の引力が地球を挟んで圧する」ように働く。地球の満潮が月に面した側と反対側で起きるのは「挟まれている」からである。逆に、月に対してもより強い地球の潮汐力が働く。このため、月は地球の潮汐ロックにはまり、一面だけを絶えず地球に向けざるを得なく、何十億年もそのまま回っている。

また、土星の衛星が土星に近づくと、物凄い潮汐力に挟まり潰され、粉々になる。それが集まって土星の輪が出来たのではないかという考えも成り立つ。木星の一番近い衛星イオは、木星の潮汐力により火山の噴火が見られることも、具体的な事例として掲げられる。

## アルベルトへの想い

彼は、何も、この広い宇宙をみながら、相対論を考えたのではない。いつも、身の回りの出来事に空想を拵げただけである。それが、宇宙の撰理に迫ってしまった。高度な科学技術の発展にも無頓着だった。興味が湧いたとしたら、それは即座にその技術の背景に横たわる見えない本質に対してである。しかも、執拗な思考実験を繰り返す。

そういう私も、本シリーズを 6 回も重ねられてきたのは、偏にアルベルトの思考方法に拠っていたことは確かである。でなければ、こんなに続くはずがない。その基本は、光速度不変原理や等価原理もどきで、

「観測実証不変の原理」

に拘った。観測こそ絶対である。アルベルトの相対論に逆らっているが、理論と観測こそ、頭脳の相対論ではないだろうか。

我が国も世界も、宇宙物理学者には、理解に苦しむ特殊相対論と一般相対論をマスターしなければならぬ巨大な岩壁がある。私は、その周りを歩いただけであるが、何となくアルベルト方程式の宇宙規模の拵がりを観てしまった。

最近、ヒッグス場で予言されるヒッグス粒子を考えた理論物理学者がノーベル賞を授与された。興味は沸いたが、腰が引けた。重力の素となる質量の起源がヒッグス粒子だという。ならば、それがアルベルトの一般相対論にどのようにつながるのか。不明のままである。素粒子標準理論では、まるで学会ぐるみのなあなあ感で 17 番目に位置づけられている。ところが、この標準理論さえ、ニュートリノ振動 (第 3 回に詳述) により見直しが迫っている。CERN も、ヒッグス粒子を発見したと発表したけど、ノーベル賞は停滞している。



<http://www.u-tokyo.ac.jp/content/400020910.png>

やはり、観測されていないものを賞すること自体、なんとなく大学における名誉表彰みたいなもの、つまり情けだらけで情けない。このことが、私の素人興味を半減させてきた。

それに対比すると、アルベルト理論の真実性は偉大すぎる。

## エピソード

この広い宇宙には、好奇心を誘（いざな）う天体や現象が数えきれないほど現れてきている。でも、それらに共通する解析ツールは、ニュートン力学や量子論で手に負えなければ、いつだってアルベルトの相対論である。この世の果てとして本シリーズ第5回で紹介したCMB：宇宙マイクロ波背景放射さえも、その分析に彼の方程式が必須である。ミステリアスなブラックホール、ダークマターやダークエネルギーも相対論を避けてはとおれない、いやそもそも相対論で成り立っている。

しかしながら、誰しも気になって仕方がないブラックホールの中身などは分析できていない。なんとかして欲しい。ブラックホールの中は本当に時間が止まっているのか？ 一般相対論では「時間は止まる」はずと言っているが、時間が止まると「運動」は生じないから、物理学の領域を超えているのかもしれない。

かろうじて、ボルツマン（1844- 1906）の熱力学というのが残っている。それによれば、エントロピーという「無秩序」の概念が出てきて、宇宙ではそれが総じて増大する方向にあるという。現在の宇宙論では「加速膨張」に当たるだろうか。その増大傾向こそ、時間の定義になるとも考えられる。身の回りで言えば、室内を掃除して整理整頓しなければ荒れる一方となる。いくらきれいにしても、建物が生物同様に朽ちてくる。これが時間の進む方向であるとも教わった。局所的には、絶対零度（ $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）という限界があって全ての物質が凍りついて、今の世界標準クロックの基となるセシウム原子の振動すらなくなる。時間が止まってしまう。時間がなくなるのは、ブラックホール内とこの局所的絶対零度になろうが、いずれもそれを観測することは不可能である、と言われている。観測自体が時間を必要とするからだ。

この時間の問題は、何故か、物理学者は避けている。とりつく島が無いのだろう。アルベルトさえ、ニュートンが定義した空間全体の絶対時間に対して、これを否定して場所に応じて時計は変わる、すなわち時空を定義したに留まっている。時とは何物か？ これを解析した科学者が出てくれば、おそらく次の世紀の宇宙論が牽引されていくのであろう。

このように考えると、私はわくわくしてくる。誰か出てきて解明してほしい。

別当 勉

<betobetoven@mail2.accsnet.ne.jp>

<参考図書等>

No.	題名	著者	発行元
1	アインシュタインの宇宙	佐藤勝彦	角川文庫
2	アインシュタインを超える	ミチオ・カク、ジェニファー・トンプソン (久志本克己訳)	ブルーバックス
3	20世紀物理はアインシュタインとともに	中村誠太郎	ブルーバックス
4	<b>時空図で理解する相対性理論★</b>	和田純夫	株式会社ナツメ社
5	「相対性理論」を楽しむ本	佐藤勝彦監修	PHP 文庫
6	<b>原子爆弾 その理論と歴史★</b>	山田克哉	ブルーバックス
7	四次元の世界	都筑卓司	ブルーバックス
8	ニュートン「自然界の最高速度:光速 C」	増補第2版 2016.12.5	(株)ニュートンプレス
9	ヒッグス粒子の謎	浅井祥仁	祥伝社新書

<放送コンテンツ>

101	<b>アインシュタインと皆既日食★</b>	ヒストリー・チャンネル 2009.12.19	ヒストリー・チャンネル
102	宇宙とその進化 第12回 一般相対論的宇宙モデル	放送大学専門科目 2016.12.17	放送大学
103	サイエンス ZERO 「ノーベル賞 2017 重力波が切り開く新天文学」	NHK E テレ 2017.12.10	NHK

<インターネット・サイト>

- 201 **76年前、核分裂を初めて記述したリーゼ・マイトナー(2015.2.10)★**  
<http://physicsbuzz.physicscentral.com/2015/02/76-years-ago-lise-meitner-first.html>

★印: 主な参考資料