

中性子で磁石をつくれるか

——パルサーが提起したひとつの問題——

浜田 哲夫*

今年の2月末に、水戸で「中性子ガスの磁性」研究会というたぶん耳なれない名前の会が開かれました。参加者総勢 20 名ばかりの小さな会でしたが、この種の会としてはひとつきわだった特徴がありました。それは、お互に名前も顔も知らない研究者が多かったことで、集まった顔ぶれを見ると、天体物理やさん、原子核理論やさん、多体問題理論やさんなど、ふだんあまり交流のない専門ちがいの人たちがまじっていました。この会でわいわいやうろとしたテーマが、これからお話す「中性子で磁石をつくれるか」ということです。この問題は大へん難かしくて、まだ答は誰にもわからない。ごくかみくだいていうと一体どういうことなのか、そして、どうしてこんな問題を考えるようになったのか、を紹介することしか今のところできません。天文月報にのる解説としてはちょっと風変わりな、物性物理的なにおいの濃いものになりますが、物理学会誌にだって天文の話がのるのだから、たまにはかまわないだろうというわけです。

1. パルサーその後

非常に規則正しい周期で、パルス状の電波を出している奇妙な天体——パルサー——については、すでにこの月報でも2回にわたって解説されています(1968年6月号, 1969年1月号)。1年半ほど前には、見つけていたパルサーの周期は、長いもので2秒、一番短かいもので0.25秒くらいでしたから、パルサーの本体は、白色わい星または中性子星の脈動であるとの説が有力でした。

ところがその後、かに星雲の中心部に、周期0.033秒のパルサーが発見されました。このいわゆるかにパルサー(NP 0532)は、パルス状電波を出しているばかりでなく、可視光やX線まで同じ周期でパルス状に発射しています。かに星雲は1054年に爆発した超新星の残骸であり、その中心部にある星のひとつが中性子星ではないかとの予想は、30年ほど前に考えられたことがあります。さらに、0.033秒という短かい周期を、白色わい星や中性子星の脈動から説明することは不可能であるこ

とが次第に明らかになって来ました。その結果、現在では、パルサーは観測されている周期で自転している中性子星であると考えられるに至りました。

中性子星とはどんな星かについても、すでに月報に解説があります(1969年7月号)。典型的な中性子星の質量は太陽と同じくらいで、半径は10km程度、したがって、密度は $10^{14} \sim 10^{15}$ グラム/ccに達します。このようなものすごい星が、1秒間に約30回の割合で自転しているのがかにパルサーだというわけです。まったく、自然界には想像を絶する現象があるものですが、とはいえ、このような現象も、現在われわれが持っている物理学の体系から決してはみ出すものではなくて、それから予想されるものであることの方がむしろ驚嘆に値するかもしれません。

かにパルサーを含めて、いろいろなパルサーについての観測データも1年半前に比べると、ずっとくわしくまた豊富になりました。特に、周期がわずかながら時間とともにのびて行くことがはっきりしています。この事情を、いくつかのパルサーについて表1にあげました。 ΔP (秒/年)は1年間に周期が何秒のびるかの割合で、これを見ると、パルサーがいかに優秀な時計であるかがわかります。

表1

パルサー	CP 0328	CP 0834	CP 0950	RSR 0833	NP 0532
周期P(秒)	0.7145	1.2737	0.2531	0.0892	0.03309
ΔP ($\frac{\text{秒}}{\text{年}}$)	6×10^{-8}	2×10^{-7}	2×10^{-9}	4×10^{-6}	1.3×10^{-5}

かにパルサー NP 0532 は、発見されているパルサーの中で、最も周期が短かく、 ΔP が大きいものです。 ΔP が大きいことは、まだ年令が若く(生れてから1000年たっていない)エネルギーをどんどん放出していることを示しています。どの程度の割合でエネルギーを放出しているかは、地上で受け取るエネルギーから推定することができます。この推定をするためには、かにパルサーまでの距離がどれくらいかということと、もうひとつ、パルサーがエネルギーを四方八方へ等方的に出しているのか、それとも特別な方向にしか出していないのかとい

* 茨城大学理学部

T. Hamada: Can a Magnet be Made of Neutrons?
—A Question Raised by Pulsars—

表2 かにパルサーのパルスあたりのエネルギー放出量 (エルグ/パルス)

電波 (195~400MHz)	可視光 (4500~8000Å)	X線 (1~10Å)
9×10^{30}	1.2×10^{33}	2.3×10^{35}

うことと、このふたつを知ることが必要です。距離として現在最も確からしい値 $1100 \text{ pc} = 3.4 \times 10^{21} \text{ cm}$ をとり、エネルギーの放出は等方的であると仮定すると、各波長領域ごとのエネルギー放出の割合は表2のようになります。光度、すなわち1秒あたりのエネルギー放出量は、パルスあたりの放出量の30倍です。比較のためにいうと、太陽の光度は 3.9×10^{33} エルグ/秒ですから、かにパルサーは太陽の2000倍近くも明るくなることとなります。

表2を見ると、もともとかにパルサーは電波を出している天体として発見されたのですが、エネルギーの放出は、波長のずっと短いX線領域で最も大きいことがわかります。X線領域での光度は、電波領域での光度の2万倍以上で、実際にかにパルサーのエネルギー放出は全部X線領域で行なわれているといつかまいません。

中性子星は超新星が爆発したあとの残がいで、核反応によってエネルギーを創り出すことはできません。1秒あたり 10^{36} エルグというエネルギーは、一体どこから供給されるのでしょうか。上でも述べたように、パルサーの周期がだんだんのびて行くことから、回転の運動エネルギーが、何らかのからくりで電磁波のエネルギーに転換しているのではないかと予想されます。太陽質量、半径10kmの剛体が1秒あたり30回転しているとすれば、回転の運動エネルギーは 1.5×10^{49} エルグになります。これだけのエネルギーがあれば、1秒間に 10^{36} エルグをはき出すことは、その放出のからくりは別として、十分考え得ることです。自転の運動エネルギーを、輻射のエネルギーに転換する媒介として、この解説の主題である磁場の問題が登場してきます。

2. パルサーのまわりの磁場

自転の運動エネルギーが、最終的にどのようにしてパルスとして放出されるのか、というからくりについては、まだいろいろな可能性が調べられているところで、はっきりわかりません。しかし、いずれにしても、パルサーのまわりには、強い磁場があることは確かだと考えられています。たとえば、エネルギー転換の第一段階として、今のところ次のようなモデルが有力です。パルサーは全体として巨大な磁石になっていて、その磁軸の方向と、自転軸の方向とは一致していません。星が磁石であるという、一見奇妙な感じがするかも知れませんが、身近な地球を思い出せば、そう奇妙ではないでしょう。

地球の場合でも、自転軸の方向と磁軸の方向とが一致していないこともご存知のとおりです。

さて、電磁気学が教えるところによると、磁石があって、それが磁軸とはちがう軸のまわりに回転すると、電磁波の形でエネルギーを放射します。このエネルギー放出の割合は、磁石の強さ、回転の角速度、磁軸と回転軸との間の角度、に関係します。かにパルサーの場合には、エネルギー放出の割合や角速度がわかっていますから、逆に磁石の強さを推定することができます。磁軸と自転軸が互に垂直であるとすると、パルサーの表面付近での磁場の強さは 10^{12} ガウス程度と推定され、かたむきの角度が 90° より小さければ、要求される磁場はこれよりも強くなります。地球表面での平均の磁場は約0.5ガウス、実験室で人間が現在作り得る磁場はせいぜい 10^6 ガウスであるのと比べると、パルサーがいかに強い磁石であるかがわかるでしょう。

このかたむいた回転磁石モデルは、上でもいったように、自転の運動エネルギーを輻射に転換する第一段階に対するものにすぎません。これを、さらにどうやって電波からX線におよぶ広い領域の、しかも周期的なパルス状のものに転換するかという問題が残っているわけですが、それにはふれなことにします。それから、このモデルは今のところ最も有力なものひとつと考えられてはいますが、決して確定したものではありません。かなり強い磁場を必要とするとはいっても、パルサー全体がいわば一様な磁石になっているのではなく、たとえば太陽の黒点のように、局所的に強い磁石になるだけで十分だとする考えもあるわけです。

3. 電磁流体力学的な考え

さて問題は、こんなに強い磁場がどのようにしてできたかです。天体の専門家は、すぐに電磁流体力学的な可能性を思いうかべます。電磁流体力学とは、荷電粒子の集まりが、電磁場の中でどのようにふるまうか、を調べる学問の分野です。中性子星とはいっても、中性子だけでできているわけではなく、その中には多少とも電子やいろいろなイオン——いわゆるプラズマ——もあるので、それらはこの電磁流体力学の対象になります。

強い磁場の存在を説明する電磁流体力学的な可能性として、最もポピュラーなのは、磁束の保存あるいは凍結とよばれる現象です。中性子星の質量はおよそ太陽と同程度です。そこで、いまかりに、ある時期に太陽くらいの星があって、それがちぢんでとうとう中性子星になったと考えるみましょう。星の進化論では、太陽程度の星がおだやかにちぢむと、中性子星ではなくて白色わい星になると考えられていますが、説明のためですからいまのところは目をつぶりましょう。さて、この太陽程度の

ひろがりの中には、平均 100 ガウスくらいの磁場があったとします。この値は太陽の平均磁場の 100 倍で、常識より少々大きいものです。もっとも、太陽でも局所的な黒点では数千ガウスに達することがあります。また、非常に特殊な星で異常に強い磁場をともなっているものがあり、今まで観測された最高の値は 3×10^4 ガウスです。問題は、この 100 ガウスの磁場が、星がちぢむときどうなるかです。

この問題に対する答はよくわかっていて、星の収縮が急速に起こるとすれば、磁束が保存することがいえます。どの程度急速であればよいかは、星のひろがり、それから星をつくっているプラズマの電気伝導度に関係します。磁束とは、磁場の強さに断面積をかけたものと考えてよいでしょう。磁束の保存とは、星がちぢんだりあるいはひろがったりするとき、磁束の値が一定に保たれることを意味します。このことが成立しているならば、半径 10^6 km ($\sim R_0$) の星が 10 km までちぢんだとき、磁場の強さは 10^{10} 倍、すなわち 10^{12} ガウスになります。この値は、ちょうどかにパルサーで考えた磁場の下限と一致しています。

今求めた 10^{12} ガウスという値は、中性子星のまわりにある磁場が、磁束の保存で説明されるとする立場をとる限り、実際よりはかなり大きいものだと思います。というのは、100 ガウスは平均磁場としておそらく高すぎることもあります。それよりも、上にも述べたように、中性子星は進化論的には超新星の爆発の残骸であって、おだやかな収縮の結果できたものではないことに注意する必要があります。太陽よりもずっと質量の大きな星が、急速に収縮してきて、爆発してその質量の大部分を吹きとばし、中心に残ったしんが中性子星になるのだという考え方からすると、せっかく相当強くなっていた磁場が、爆発のためにまた弱くなってしまうだろうと思われるからです。

なお、ついでですが、大きな星がちぢんで中性子星になったという考えで、かにパルサーのように 1 秒間 30 回転といった大きな角速度を理解することができます。フィギュアスケATINGで、腕をちぢめることによってスピンの角速度を大きくできることは、よく知っていることです。星の場合でいえば、半径の 2 乗と角速度の積が、外からトルクが働かない限り一定になります(角運動量保存則)。そうすると、かにパルサーが太陽くらいにひろがっていた時期に、10 年に 1 回転程度の角速度を持っていたとすれば十分なことになります。

強い磁場を作る電磁流体力学的な可能性として、次にダイナモとよばれるからくりがあります。まずたねになる非常に弱い磁場があったと仮定します。この磁場の中にプラズマをほうり込みますと、荷電粒子の運動で電流

があることとなりますから、その電流が磁場をつくります。普通は、このようにしてできる磁場は、もともとある磁場をうち消す方向をむきます(レンツの法則による反磁性)。ところが、星の内部では、荷電粒子には磁場がおよぼす力のほかに、複雑ないろいろな力学的な力が作用しています。そのために、非常にデリケートな話になりますが、とに角荷電粒子が作る電流が、もともとある磁場を維持するように作用するばかりでなく、ある場合には増幅する可能性があるという理論的に考えられています。この理論は、実際に地球の磁場の説明のためにくわしく調べられています。ダイナモ理論はきわめて複雑微妙で、中性子星に応用した場合、一体どのくらいの強さの磁場ができるか見当をつけるのが難しいのですが、常識的におそらく数ガウス程度で、 10^{12} ガウスなどというどえらい磁場は、とうていつくれそうにもありません。

同じく電磁流体的な考えで、もうひとつ以下のようなものがあります。上にも述べたように、中性子星の中にはまだかなりの電子といろいろなイオンがあります。中性子星内部での重力場は、密度が高いためにものすごく強いものです。電子とイオンでは質量がうんと違いますから、作用する重力はずいぶん違います。その結果非常にわずかですが、+ と - の電荷の分離が生じ、それには電場がともないます。中性子星が全体として回転すると、電磁気学の教えるところによれば磁場が発生します。その強さは、まだきちんと計算されていませんが、おそらく 10^5 ガウス程度にはなれるのではないかとわれています。これも 10^{12} ガウスにはとても及びません。

このようにして、電磁流体力学的な考えで、パルサーのまわりの非常に強い磁場を説明することはどうも難かしそうです。今までの話は、いずれも荷電粒子を使って磁場をつくらうとする考えでした。もともと、中性子星の中に一番たくさんあるのは中性子なのだから、磁場の源としてその中性子自身が考えられないでしょうか。それがこれからのお話になりますが、その前にひとつ予備的な話をしましょう。

4. 鉄はどうして磁石になるか

磁場の源として中性子がすぐ頭にうかんでこないのは、たぶん中性子が電気的に中性だからでしょう。磁場といえばまず連想されるのが電流で、中性子はいくら動きまわっても、電流にはならないからです。しかし、磁場といわれたとき、電流よりもむしろ馬蹄型の鉄の磁石の方を連想する人も多いでしょう。なるほど鉄は金属ですから、あの中には、かなり自由にとびまわっている電子があります。鉄を磁石にしているのは、この電子がつくる電流なのでしょうか。そうではないことがわかっています。

電子ひとつを考えます。この電子は3次元空間を勝手に動きまわりますから、自由度は3です。ところが、いろいろな原子から出る光をくわしく調べることによって、電子は運動の自由度のほかに、もうふたつの自由度を持っていることがわかりました。これは、もう50年以上昔のことです。この自由度は、電子が運動しないとしても残っているもので、これを普通スピンと呼んでいます。電子がスピンを持つことは、その後ありとあらゆる実験で確かめられ、現在これを疑う人はありません。スピンという言葉からは、電子の自転が連想されます。実際、電子が止っていても残っている自由度といえば、自転を考えるのが自然です。ただ、われわれが巨視的物体について頭にうかべる自転と、電子のそれとは、いろいろな点で大いに違います。

さて、電子はこのスピンにともなって、磁気能率を持ちます。ひらたい言葉でいえば、電子ひとつひとつが小さな磁石だということです。動きまわれば電流になりますから、磁場の源になることはわかりやすいでしょうが、止っていてもそのまわりに磁場をつくるのです。電子の運動状態には関係がないので、この磁気能率を特に固有磁気能率と呼んで、軌道運動にともなう磁気能率とは区別することがあります。

どんな物質の中にも電子はあり、その電子ひとつひとつがみんな磁石であるのならば、どんな物質でも磁石になるかという、決してそうはなりません。それは、大ていはこの小さな磁石のむきが全くでたらめなので、全体として打消し合ってしまうからです。もし、この電子の集まりに外から磁場をかけたとします。すると、小さな磁石は力をうけて、むきがそろいますから、全体として磁石になります。しかし、外からの磁場を切ると、またもとのでたらめな状態にもどってしまい、磁石でなくなるのが普通です。鉄とかニッケルとかのいわゆる強磁性の金属では、外からの磁場を切っても、かなり固有磁気能率の向きがそろっていて、したがって何時までも磁石のままているわけです。すなわち、鉄を磁石にしているのは、その中の電子の軌道運動にともなう電流ではなくて、スピンにともなう固有磁気能率なのです。

固有磁気能率のむきがそろうことを、普通簡単にスピンのそろうといいます。強磁性の物質で、外からの磁場がなくともスピンのそろうのはなぜでしょうか。これは物理的にかなりめんどうな問題ですが、ごくかみくだいていえば次のようなことです。物質の中で、ふたつの電子の間に作用する力は、スピンの向きによってちがいます。強磁性の物質では、スピンのそろった対の間では引力、スピンの逆向きの対の間では斥力になっていて、スピンのそろった方がエネルギーの低い安定な状態だというわけです。ふたつのスピンのそろったときと、逆向き

のときのエネルギーの差のことを、交換エネルギーと呼びますが、この交換エネルギーの符号がすべてを決定することになります。

もっとも、交換エネルギーの符号が強磁性を示すようなものであっても、その値があまり小さければ実際には強磁性を示しません。温度が高くて、それにとまなう熱運動のエネルギーが、交換エネルギーよりも大きいときには、スピンのそろう傾向が熱運動によって乱されてしまうからです。交換エネルギーと同程度の熱運動エネルギーを生ずるような温度をキュリー温度と呼びます。たとえば、鉄のキュリー温度は1043°Kです。強磁性物質の温度をあげて行くと、キュリー温度をこえるところで強磁性を示さなくなります。このようにして測定したキュリー温度から、逆に交換エネルギーの大きさを推定することができます。恒星にしる惑星にしる、磁場の源としてこのような強磁性の可能性を考えないのは、内部での温度がキュリー温度よりずっと高いからです。

5. 中性子で磁石をつくるるか

鉄が磁石になるのは、電子が荷電粒子であることとは本質的に関係ないことを上で見ました。そうすれば、中性子の集まりが、電荷を持たないからといって、磁場の源にならないとは限りません。まず、中性子はスピンを持っているという点で電子と同じです。そしてまた、電荷がないにもかかわらず、スピンにともなう固有磁気能率を持っています。すなわち、中性子ひとつひとつが小さな磁石なのです。磁気的な性質の面では、中性子は軌道運動による磁場をつくりませんから、むしろ電子より簡単です。

いま、半径10km、太陽質量の中性子星を考えましょう。この中には、約 10^{57} 個の中性子がありますが、そのスピンの全部そろったとすると、この中性子星の表面あたりでの磁場の強さは 10^{16} ガウスというものすごいものになります。もちろん、この値は、中性子ひとつひとつの磁石の強さが大きいから出て来たのではなく、磁石の強さは小さいのだけれども、中性子の数が多い、すなわち密度が高いから出て来たのです。 10^{12} ガウス程度の磁場をつくり出すには、スピンの全部そろう必要はなく、文字どおりほんのわずかの割合そろえば十分であることがわかります。

ところが、そのほんのわずかの割合でスピンをそろえることも、実は容易ではないのです。普通の地上にある原子核の中には、陽子と中性子がほぼ同数つまっています。陽子の数も中性子の数も偶数であるような核が一番多いのですが、これらの核の全スピンの例外なくゼロであることは、実験的によく確かめられた事実です。この

ことは、陽子は陽子同志、中性子は中性子同志で、ふたつずつスピンの打ち消し合うように対になっていることを示しています。このような原子核はしたがって磁気エネルギーを持ちません。

陽子と中性子をひっくるめて核子と呼びますが、核子をひきつけ合って原子核というかたまりを作っている力は何でしょうか。電気的にはプラスとゼロしかないのですから、電気的な力ではないことは明らかです。万有引力は弱すぎて、とうていこんな強い結合をし得ないこともわかっています。それで、昔からよくわかっている電気的な力や重力とはちがう、新しい力を考えざるを得ません。この力のことを核力と呼んでいます。核力は、電気力や重力に比べると、はるかに強いばかりでなく、はるかに複雑です。特に、ふたつの核子のスピンのそろっているか、逆向きに打ち消し合っているかで、うんと違います。このようにスピンの向きぐあいで力が違うのに、なぜ原子核の中でスピンの打ち消すように核子がふたつずつ対になるのか非常に不思議です。原子核の専門家はあまり不思議だと思わないらしいのですが、とに角、自然に存在している原子核はそうなっているのですから、原子核程度の密度では、スピンの打ち消し合うようにくみ合った方が、エネルギーが低くて安定なのだと考えざるを得ません。

中性子星は、中性子だけでできている巨大な原子核だと見なせます。もっとも、この場合、結合は万有引力によるもので、核力によるものではないところが、普通の原子核とは違います。中性子星の密度が、地上での原子核内の密度と似たようなものであるならば、やはりスピンは打ち消し合って、中性子星が磁石になることはないでしょう。しかし、上で何度も出て来た太陽質量、半径 10 km の星の密度は約 5×10^{14} グラム/cc で、これは地上での原子核内の密度のおよそ倍です。これよりさらに高密度の中性子星の存在も予想されます。だから、地上に存在する原子核内で中性子のスピンの打ち消し合っているからといって、中性子星内でもそのようになっているとはいえないわけです。また、陽子がほとんどないことも、普通の原子核とは事情が違います。

このような高密度の中性子の集まりが、本当に磁石になるかどうかは、実験室で確かめるわけには行きません。問題にしているような高密度の中性子の集まりを作れないからです。さきほど述べた核力についての知識と、多数の粒子の集まりを取扱ういわゆる多体理論とから、理論的に推論するしかありません。かりにスピンのそろった方がエネルギー的に安定であるとしても、さきに述べたキュリー温度のことが心配になるかも知れません。たとえば鉄の場合、交換エネルギーはそのもとをたずねて行くと、結局は電気的な力です。中性子の集まりの場合には、もとになる力は核力で、その強さは電気力の 10^6 倍くらいです。したがって、交換エネルギーも鉄などの

場合の 10^6 倍くらいになりますから、キュリー温度は 10^8 K に達するでしょう。一方中性子星は、星としてはそう高温ではなく、その温度は 10^6 K 程度と考えられています。もしスピンのそろうとすれば、それが熱運動によって乱される心配はないことがわかります。

核力については、わからないこともまだまだたくさんありますが、いくつかの特徴ははっきりしています。まず、核力は重力や電気力に比べて、非常に有効範囲がせまい力です。ふたつの核子が、 10^{-13} cm 程度にまで接近しないと、お互いに力を及ぼし合いません。そのかわり、これ以内に近づくと作用する力は電気力の何十万倍も強いのです。ですから、密度が十分低くて、中性子間の平均距離が 10^{-13} cm よりずっと大きいときには、中性子はお互いに力を及ぼし合わないと考えてよいので、理論的な取扱いは大変やさしいものになります。一方、中性子星のように密度がうんと高いときには、中性子間の距離は 10^{-13} cm よりも小さくなるので、近距離での核力の様子がわからないと困ります。ところが、近距離での核力は実は一番よくわかっていないのです。ただひとつ、ふたつの核子が 0.4×10^{-13} cm くらいまで近づくと、非常に強い斥力が作用することは大体確かだと考えられています。核力のこの部分だけに注目すると、ちょうど核子は半径 0.4×10^{-13} cm の固いしんを持っているように見えます。このしんの外側には、複雑な引力や斥力やらの部分があるわけですが、密度が十分高くて、このしんがちがちぶつかるくらいになれば、外側の核力の様子はあまり重要でないだろうと考えられます。

このような考えに立って、固いしんだけを持った中性子の集まりが、磁石になれるかどうか、昨年から今年にかけて、主にアメリカと日本で調べられました。こんな単純化された問題でも、近似なしで解くことはできなくて、答は使った近似によってちがうようです。大勢は、密度が十分高ければ磁石になるという方に向いています。少数ながらそうはならないという結果も出ています。決着を見るまでには、まだしばらくかかりそうです。

固いしんだけではなくて、その外側にある複雑な核力も考えに入れて、スピンのそろうかどうかを問題にした研究は、まだほとんどありません。通常の原子核に対しては、ずいぶん多くの人いろいろな計算をしています。全部ははじめからスピンは互に打ち消し合っているとして出発していますから、スピンのそろうかどうかについて、これらの計算結果は何も教えてくれないのです。

結局のところ、「中性子で磁石がつかれるか」という問に対しては、「今のところわからない」と答えるしかありません。おそらく、この間に答えるために、これから数年の間、世界中で多くの人さまざまな方法で研究を進めることでしょう。その間に、一方ではそんなに強い磁場を必要としないパルサーのモデルができ上がるかも知れませんし、また、強い磁場が必要ではあっても、それを中性子以外のものでもうまくつくり出すからくりが見えるかも知れません。