

## 放射光リングとカオス

富家 和雄 (高エネルギー物理学研究所・名誉教授)

南海の帝と北海の帝が、中央の帝である混沌のところで偶然一緒になった。混沌は喜んで二帝を丁寧にもてなした。二帝はこの好意にお礼をしようと相談して、ノッペラ坊の混沌の顔に目耳鼻口の七つの穴を開けてやることにした。七日目にその仕事が終わったとき、混沌は息が絶えてしまった。(荘子)

初代PF施設長の高良さんはこの話が好きで、事が揉めると、「混沌は混沌のままにしておけ。混沌に目鼻をつけると死んでしまうからな」と嬉しそうにいていた。その揉め事が政治とか非常に人間臭い事柄なら、これも一つの解決方法であるが、私の専門である放射光専用リングで起こった混沌、カオスには目鼻をつけなければならないと思った。

カオス、混沌は無秩序を意味している。1986年、ロンドンで開かれたカオス国際会議で、数学用語としてカオスは「決定論的システムにおいて起こる確立論的なふるまい」と定義されたそうだ。長年にわたって物理学者はニュートン力学と、それを修正する特殊相対論、それにマックスウエルの電磁場方程式という決定論を信じて研究をしてきた。もう一つの原理である量子論は、極微の世界では決定論は通用せず、確率のみで事は記述されるとして、確率波についての微分方程式を作った。微分方程式で記述されるからには、これも一種の決定論ともいえるが、いささかカオスの世界に足を突っ込んでいる。この曖昧さを嫌ったのが真の決定論者であったアインシュタインで、初期の量子論の指導的役割を果たしたボルンに次のような書簡を送っている。(Ian Stewart著：“神はサイコロ遊びをするか？”から。)

貴殿は神がサイコロ遊びをするものと信じており、そして、わたしは完全な法則性と秩序の存在を信じています。

さて、粒子加速器の建設は何を信じて行なうのか。陽子加速器の場合はSSCを除いて、現在のエネルギー程度のものならば、相対論で修正されたニュートン力学とマックスウエルの方程式を使って設計する。加速器の製作は決定論的システムが当たり前、と思っている工業界が行うので、出来た加速器は決定論的システムであり、そこには何らのカオス的性質は存在し得ないと信じられてきた。

一方、高エネルギー電子円形加速器の場合は大量の放射光を出す。極微の世界の電子が極微の世界の光を放出するのだから、そのプロセスは量子力学に従わなければならない。古典的描像によると、水素原子の電子は、電子の1836倍の質量の原子核との間のクーロン力によって原子核を中心として回転している、というのが長岡モデルである。しかしそれよりも10数年前、マックスウエルの方程式を厳密に解いたリナールの理論によると、電子は放射光を出してエネルギーを失い、原子核に吸収される。天才ドブロイは電子は量子力

学的に安定した軌道、つまり波の性質を持つ電子が原子核の回りを一周したとき、波の位相が元の位相と同じとなる軌道にのみ電子が存在するといった。その軌道は沢山あって、それぞれの軌道に属する電子のエネルギーは異なる。高いエネルギー準位にいた電子は空きさえあれば、より低いエネルギー準位の軌道に乗り換えられ、そのとき余分に持っていたエネルギーを光として放出する。従って光のスペクトル分布はその原子固有の離散スペクトルとなる。原子での電子の軌道半径は $10^{-8}$ センチ程度だが、もし半径がメートル級になると、エネルギー準位は連続と見てよいだろう。求心力が電場でなく、磁場である電子リングなら、軌道半径はメートル級になる。そこから放射される放射光のスペクトル分布を量子力学で解いた人がいたが、結果はマックスウェルの方程式の厳密解と一致したそうだ。だから放射光の発生機構は決定論的かという、全く違う。

スペクトル分布が一致しても、ある電子が何時どんなエネルギーの光を出すかは予測できない。アインシュタインが“神はサイコロ遊びをするか”と問うたのは、まさにこの事なのである。中には変わり者の電子がいて、立て続けに高いエネルギーの放射光をだして、電子の運動エネルギーが急速に低くなることもありうる。これを電子ストレージ・リングの立場からみるとどうなるか。放射光を放出してエネルギーを失った電子は、リング中にある高周波加速空洞にある電場で加速されるが、シンクロトロン位相安定性の原理で電子のエネルギーは振動を始める。詳しいことは言わないが、放射光を適度に放出し続けると、振動の振幅は減衰して電子エネルギーは設計値に戻る。このシンクロトロン振動にはエネルギーの限界があって、その限界を超えると電子はエネルギーを急速に失い、真空容器の壁に当たって死ぬ。従って、シンクロトロン振動の数周期の間に、立て続けに放射光を放出して電子エネルギーがこの限界を超えた電子は失われる。このような電子を統計

的に見たとき電子の寿命が決まり、これを量子的揺らぎによる電子寿命という。もともと寿命という言葉はカオス的である。昨日まで元気だった人が、次の日にポックリ死んでしまう事がしばしば起こるからである。

リングの設計者はこの現象にどう対処するのか。シンクロトロン振動のエネルギー限界を広げれば電子寿命が長くなるから、高周波電場を必要以上に高くし、量子的揺らぎによる電子寿命を数日程度にすることができる。電子寿命はこの他に、電子が真空中の残留ガスと衝突して、大きく軌道を逸れて失われるという現象の確率によって左右される。この現象も電子が何時、どの程度に大きく軌道から逸れるかは予知できないからカオス的である。従って、リングの電子軌道の所は可能な限り超高真空にする必要がある。この二つの現象はカオス的といっても、その確率が分かっているから設計者は対処できる。フォトン・ファクトリーのリングは対処の仕方が良かったのか、蓄積電流値と電子寿命の積が23アンペア・アワーという信じがたい世界記録を作ってしまった。

現在、これをユーザーの立場から見るとどうであろうか。試料に放射光を当てて反応を測定しているとき、実に安定していると思うだろう。1時間もすると、少し放射光の量が減っていることに気がつくが、電子にも寿命があるから仕方ない、別に実験に支障がある訳ではないから構わない、と思っている。つまり、ユーザーにとって電子リングは疑う余地のない決定論的システムなのである。しかし、ここまできるとは実に色々な不安定を克服しなければならなかった。

1982年3月、PFリングは試運転に成功し、6月からは一部ユーザー・タイムが始まり、初期は真空度を上げ電子寿命を延ばすことに専念した。1983年に入ってから変な現象が出てきた。常時電子ビームの太さ、つまり電子密度を測定していたのだが、その電子密度が揺らぎ始めたのである。リングの運転パラメータを変えても揺らぎは止ま

らないし、段々揺らぎが大きくなり、そろそろユーザーから文句がでるだろうと思っていた。そのうちに揺らぎに何か周期らしきものが見え始めた3月、ユーザー・タイムが終わる3日前、完全な周期運動となり、振幅は最大が最小の倍を超えた。数人のユーザーがコントロール室に駆け込んできて、何とかして下さい、実験にならないんです、という。私は真空グループに頼んで、真空ポンプのスイッチを次々と切って貰った。4分の3のポンプを切ったら電子密度は安定した。その後、真空度を変えて振動の周期測定したら、完全に直線的関係があることがわかり、私はほっとした。つまり周期運動はカオスでなく、決定論で解決できるからである。電子密度が安定している状態から、周期運動に移行する間にはカオスの現象が見えたが、原因を分析する暇はなかった。

さてこの6月に再びリングの運転が始まった。見ると周期は100ミリ秒くらいで、ピクッ、ピクッと電子密度はパルス的に動くだけである。そのパルス幅からこの現象はイオン捕獲による2種類ビーム不安定と見当をつけた。電子が残留ガスをイオン化して、そのイオンが電子ビームの電場で捕獲され、捕獲イオンの量が多くなり、ある量に達すると電子とイオンの間に集団運動が起こって不安定になる。そこで私は直観的に、連続するRFバケツの3分の1を空、つまり電子を入れない状態にすれば不安定はなくなると思った。実験してみると大成功だったが、すぐに私の直観が間違っていたことに気がついた。完全にこの現象が解明されるには、さらに4年の年月が必要だった。しかしどんなに複雑な現象でも、それが決定論的システムならば、決定論を使って解明できる一つの例である。

ビームが段々安定になるに従って、あることが気になり始めた。蓄積電流値、電子寿命とリングの平均真空度は一枚のチャートで連続的に記録しているが、或るとき突然電子寿命が短くなる。10時間の寿命が半分に減ったり、極端なときは数分

まで下がる。それがスーと元に戻ることもあるが、暫くそんな状態でもたつくこともある。また途中まで寿命を回復しながら、そこで再びもたつくこともある。もちろんチャート上の蓄積電流値に段ができるが、真空度のチャートには全く変化がない。世界の他の放射光施設から何らの報告もないが、見学にいくとその現象はどこでも起こっている。原因は何かと質問しても、皆分からないという。その中でSSRLのウィニックさんは、原因はわからないがアンデュレータの間隙を変えている最中に頻繁に起こるみたいだ、といていた。

そこで1983年11月から832時間のユーザー・タイムのチャートを分析した。寿命が3分の1以下となる現象のみを取り出して、それが起こる時間間隔の分布をとった。するとそれはポアソン分布で、平均時間間隔は29時間だが、5時間あたりに分布のピークがある。これはそれぞれの事象が独立であり、いつ起こるかは予測出来ないことを意味している。量子的現象を除いて、私が決定論的システムと思っていたリングを使って、神様がサイコロ遊びをしているのである。幸いユーザーに大きな不都合は与えていなかったが、またあの現象が起きましたね、とユーザーに挨拶されると嫌な気分がする。

この二つの現象、イオン捕獲によると思われるビーム不安定と電子寿命の激変を解明するために、12番目の偏向電磁石(B-12)中の或る場所の電子軌道の接線方向の先に、ガンマ線測定器を置き、常時ガンマ線の量をチャートに記録させた。イオン捕獲が起こっているときは、電子ビームがパル的に広がり捕獲したイオンを掃き出し、再びイオンを捕獲する様が目で見るように見える。不安定を除去するとガンマ線の量は一定となるが、これは電子が残留ガスに衝突して発生した制動輻射である。しばらく見ているとガンマ線の量が突発的に多くなりバーストの状態となる。その量はバックグラウンドの50倍に達することがある。

そのとき別のチャートで記録されている電子ビームの寿命を見ると、極端に短くなっている。電子寿命の回復の時間的变化は、ガンマ線の量が減っている時間的变化と一致する。初めは真空壁のどこかからガスが噴出しているのではないかと思っただが、色々計算してみると寿命が数分になるような現象は説明できない。これは何か塵を抱え込んだとしか思えないが、どうして塵が捕獲されるのだろう。あれやこれやと仲間達と議論していたが、ある日北村さん(現光源教授)が嬉しそうにやってきて説明を始めた。「真空壁から塵が飛び出したとすると、塵は放射光に曝されますね。すると塵の中の原子から光電子が放出されるので、塵は正の電荷を持ちます。その電荷量は塵の大きさで違いますが数千とも数万ともなります。従ってこの塵は容易に電子ビームにトラップされるのです。計算によると直径が数ミクロンの塵でも捕獲されるのです。ただし塵が1個でいいのか、小さい塵が無数に出るのかはガンマ線の測定からは分かりません。」

これで納得したのだが、1986年10月に面白いことが起こった。ユーザー・タイムが始まる直前、真空グループが真空システムを立ち上げている最中、ソ連の副首相一行が見学に来てきた。警備の関係で真空グループはリング・トンネルから追い出された。彼らが帰った後、作業を続行したのだが、真空パイプは全部つながっているものと思い真空を引き始めた。ところがB-5のところのパイプが繋がってなくて、ポリエチレン製のキャップを被せてあった。それが真空に引かれてB-12の所まで約40メートルも走ったのである。パイプを覗くとポリエチレンの粉が一杯くっついている。皆青くなって掃除に掛かった。3日目にもう良いとベイキングを行い真空を引いたら、すぐに $10^{-11}$ トルまで真空度がよくなったので電子の蓄積を始めた。すると電子寿命は短くなったり長くなったりガタガタで使いものにならない。一方真空度は良好である。つまり真空壁に付着した

ポリエチレンの微粒子が次々に飛び出してきて電子ビームに捕獲されるのである。何故微粒子が飛び出すのかは証明されてはいないが、バンチした電子の塊が走るとき真空容器の中につくる強力な励起高周波電場に引っ張られて飛び出す、と解釈される。それから10日ぐらいこの現象に悩まされたが、そのうちになんとか収まった。

これで塵捕獲説はかなり有望となったが、駄目押しの実験をやった。原理は書かないが、捕獲された塵が電子の中心軌道より外側にあると、サククロイドを描きながら中心軌道に沿って時計回りに走りだす。内側の塵は反対方向に走りだす。偏向電磁石を出ると波状運動となるが、次の偏向電磁石に入ると、そこへ飛び込んだ状態によるが、あるものは撥ね返されるが、ある塵はそこを通過できる。つまり、捕獲された塵は電子軌道に沿って拡散していくのである。最初のガンマ線測定器が狙っている電子軌道の場所から、電子軌道の下流約40メートル離れた場所(B-18)を狙うもう1台のガンマ線測定器を置き、ガンマ線のバーストを見比べると、同時にバーストが観測されることが多い。このことは推測が正しいことを示している。

では何故超高真空の中を塵が飛び交うのか。これについて色々な仮説を立てたが、実験的に証明しないうちに定年退官を迎えてしまった。1987年から電子を陽電子に切り換えたので、イオン捕獲によるビームの不安定は完全になくなり、また、塵捕獲の現象も消えた。しかし塵は相変わらず飛び出しているようで、100時間に1回位は電子寿命の激変とガンマ線のバーストが起こるが、その持続時間は100ミリ秒以下、いまり二つの測定器の時間分解能ぐらいらしい。これは塵が電子ビームを横切っているのであろう。

このカオスの根本的な原因は解明されていないが、混沌に口と二つの鼻の穴と二つの耳の穴はつけたと思う。しかし二つの目玉は輪郭のみ。これを「画龍点睛を欠く」というのだろう。