

時空の対称性を探る反物質

東京大学名誉教授
理化学研究所基幹研究所上席研究員

山崎 泰規



ただいまご紹介にあずかりました山崎でございます。本日は「時空の対称性を探る反物質」というタイトルでお話をします。ちょっと無理があるのですが、香取先生のお話といひ具合のペアになればいいなあとというわけで、こういう風にしました。

テーマは反陽子、反水素の性質を精密に調べるといふものです。こういう話を同業者にしますと、そんなことをやっても水素と何も変わらないだろうといって、受けの悪いことがよくあります。確かにこれまで知られている物理学の法則に従いますと、水素と反水素は同じ性質のはずなのです。が、それが本当かどうかを確かめたいというのがわれわれの反水素研究の動機です。物理学は実験の学で、実際に確かめるまでは物事がどう起こるかは分からない、というのがまじめな物理屋の基本的な立場で、それが世の中を変える発見をもたらすことがあります。従って、それまでに知られている理論から見たら自明のことも確かめようとします。新しい発見がなされ、それを説明する理論が明らかになりますと、発見された現象の説明は論理的にできるようになります。一方、非専門家の方々はおおむね好意的です。サイエンスにもそういうところがあります。

今日のお話のあらすじは表1のようになります。まず、われわれの住んでいる宇宙、世界と反物質の関わり、また、先ほど震災の話もありましたが、エネルギーとの関わりに少し触れます。そして、反粒子がどのようにに登

表1 目次

1. 宇宙・反物質・エネルギー
2. 反粒子の登場
3. 冷反水素研究
4. 反陽子の生成と冷却
5. 反水素の合成・操作・捕捉

場したか、その中でわれわれは反水素、特に冷たい反水素を使って研究しているのですが、それをどういう目的でやっているか、その目的を達成するために反陽子をつくり、捕まえて冷却し、陽電子と混合して反水素を合成するのですが、そのときどんな物理過程を利用しているかといったことを順番にお話ししたいと考えています。

まず、宇宙の話です。図1をご覧ください。これはよくある絵で、皆さんも似たものをご覧になったことがお有りかと思います。左上に書いたビッグバンが137億年前に起こり、これが世界の始まりだというわけです。想像力を働かせますと、136でも138でもなく137であると分かっているのはそれ自体ですごいことですね。例えばあることが136日前に起こったのか137日前に起こったのかといわれてもなかなか答えられません。そう考えると100億年以上前のことがこの精度でわかっている、あるいは、分かっていると信じる事ができているのは大変なことです。

そのビッグバンの直後、いまの物理学の枠

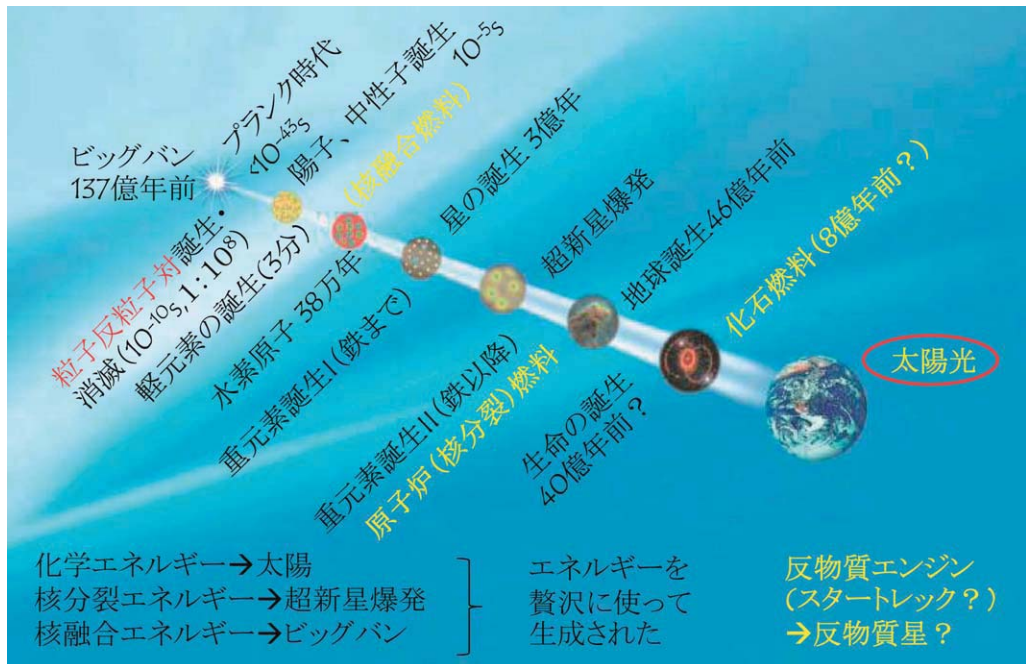


図1 宇宙史。ビッグバンから現在まで

組みでは、はじめの 10^{-43} 秒はどうも手のつけようがありません。その後のことがちゃんとわかっているのかといわれれば、それもちょっと危ないかもしれませんが、もう少し経ちますと、あたかも旧約聖書の世界のように、はじめにあった光の塊から粒子と反粒子の対ができます。光があって、粒子と反粒子のペアができて、それが膨張しながら、その過程でペアの大半が消滅して今に至るというのが基本的なシナリオで、 10^{-5} 秒くらい経つと、陽子や中性子ができ、3分くらい経つと、ヘリウムなどの軽元素ができたと言われています。勿論私は見てきたわけではありません (笑)。

38万年くらい経つと、宇宙はずいぶん冷え、電子と陽子が結合できるようになります。水素原子の形成です。そのため、水素原子を励起・電離できないエネルギーの低い光は吸収されなくなって、遠くまで到達できるようになります。従って、遠くが見えるようになるわけで、これを宇宙が晴れ上がるといいます。今日のメインテーマである反水素は、こうや

ってできた水素の相棒です。反水素は、陽子の代わりに反陽子という負の電荷を持ったものが真ん中にいて、その周りに電子の代わりにプラスの電荷を持った陽電子が捕まっている原子、反原子、です。

さらに時間が経ちますと、互いの重力のため、原子は次第に集まって収縮して温度が上がり、3億年くらい経つと核融合反応が起こるようになります。そのため大量のエネルギーが放出され、その部分が明るく光り輝くようになります。星の誕生です。水素が融合してヘリウムになり、ヘリウムが融合して炭素になり、と元素が次々合成され、星のサイズによりますが、鉄まではエネルギーを放出しつつ核融合反応の進行が可能です。鉄の原子核はエネルギー的に最も安定なため、そのあたりで融合は止まります。こうして核融合に伴うエネルギー供給が止まると、星は急激に冷えて収縮し、そのため大きな重力エネルギーを得て再び温まります。星のサイズによっては超新星爆発し、昼間でも見える位の明るさで観測されることもあります。これは

ゆっくり燃えているのではなく、ドカンと爆発するので、エネルギー的に安定でない鉄より重い元素も合成されます。その中にはウランなどの核分裂をおこす元素も入っています。それらの元素を集めて原子炉（核分裂炉）の燃料にしています。一方、ビッグバンで“燃え残った”水素等は核融合炉の燃料になります。

地球はビッグバンから91億年、今から46億年ぐらい前に誕生したといわれています。生命は40億年前、化石燃料は8億年ぐらい前のようです。それでわれわれはいま図1の右下にいます。このように、われわれが使っている、あるいは、使おうとしているエネルギー源というのは、化学的なエネルギー、石炭でも石油でも化学反応を経由するもの、は基本的に太陽光の助けで合成されています。原子炉に用いるウランなどの核分裂をおこす元素は超新星爆発における非平衡過程で生成されました。核融合に使うものはビッグバンの燃え残り、というわけです。以下簡単にご説明しますが、これらの材料はすべて非常に贅沢な（エネルギーを大量に消費する）方法で準備されています。従って、われわれの手で一から準備するのは容易ではありません。

こういう話を冒頭に持ってきたのは、反物質エンジンというものが『スター・トレック』などサイエンスフィクションによく出てくるためです。燃料能率がいいので、これを燃料にすれば遙か彼方で旅行できるというわけです。同時に、他のエネルギー源と同様、これも高効率の破壊兵器になり、人間社会に厄をもたらし心配があります。そこで、そういう可能性/おそれが本当にあるかをまずは考えておこうというわけです。結論を先に申し上げますと、一から反物質をつくらっていたのでは全く採算に合いません。反物質星とかその手のものを見つけて、そこから拾ってくる（採掘する）ようなこと

でもなければ不可能です。

そう思っていましたら、ヴァン・アレン帯に大量の反陽子が捕まっているというニュースがありました。地球には磁場があるために、これに荷電粒子が帯状に捕まっています。これをヴァン・アレン帯と呼びます。このニュースは比較的最近ですが、実験がなされたのは2006年のようです。地球の磁力線は南極からでて円弧を描いて北極に入ります。荷電粒子は磁力線に巻き付くため、磁力線と垂直方向には自由に動けません、磁力線の方には動くことができます。そのために、極付近では、荷電粒子は磁力線にそって地表近くに達することができ、大気と衝突してこれを光らせませす。オーロラです。このヴァン・アレン帯に、普通の荷電粒子だけでなく、反陽子も捕まっていることがわかり、もしやというわけで、その強度測定が行われました。

図2の黒い四角は宇宙線に含まれる反陽子の運動エネルギー分布を示しています。一方、この実験で明らかになったヴァン・アレン帯中の反陽子のエネルギー分布は赤い四角です。宇宙線に含まれている反陽子の1,000倍も高強度であることが分かります。これはあるいは反物質エンジンの燃料として使えるかも知れないというわけで、本当にどれくらいエネルギーが得られるかを計算した人がいます。

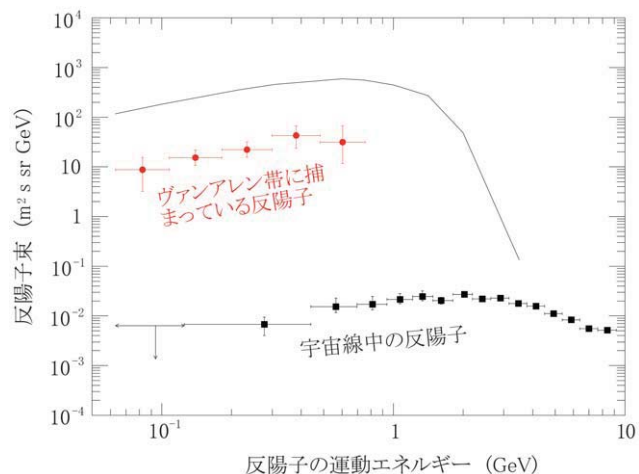


図2 宇宙線とヴァン・アレン帯中の反陽子のエネルギー分布

が、全部集めてもバナナ1本を食べた程度のエネルギーにしかならないそうです。やはり、我々の手の届くところから反物質燃料を集めるのは難しそうです。

次に、太陽から地球に届いているエネルギーを考えましょう。年間 5×10^{24} Jという量です。これは太陽が放出しているエネルギーの20億分の1くらいです。このように太陽が放出しているエネルギーのごくごく一部が地球にたどり着きます。さらにその30%ぐらいは大気で宇宙に反射され、16%が大気に吸収され、風を起こすなど気象現象を引き起こします。地上に到達するエネルギーは半分程度で、そのうちの1%ぐらいが光合成により蓄積されるようです。こういった数字が雲の発生や火山の噴火、山火事等で大きな影響を受けることは想像に難くありません。一方、人類のエネルギー消費量は 10^{20} J程度で、太陽から地球に届いているエネルギーの1万分の1くらい、光合成で固定しているエネルギーの10分の1ぐらいに相当するようです。こういう桁の違いが何を意味しているかは注意深く考える必要がありますが、桁の違う話だということにとりあえずご注目ください。地球環境問題も少し落ち着いて考えることができるような気がしますし、人類の側が多少調整しても全体に大きな影響を与えるのは容易でないことも想像できます。

次にエネルギー利用効率を考えてみます。これもいろいろな定義の仕方があるのですが、例えば1kgの燃料を持ってきたときにエネルギーをどれくらい引き出せるかという量で考えてみます。効率を客観的な数字にする一番安直な方法は、アインシュタインの有名な式 mc^2 を使って質量をエネルギーに換算し、得られるエネルギーとの比を取ることでしょうか。化学反応というのは1回あたり、化学の専門の方が会場においでにならないとも限らないので迂闊なことを申し上げてはいけないのですが、大まかに数eV程度でしょうか。一方、陽子1個の質量は1GeVぐらいのエネルギーに対応するので、化学反応の効

率は $10^{-9} \sim 10^{-10}$ 程度であるといえます。化学反応を起こしますと、エネルギーを放出し、その分質量が軽くなっているわけです。

これも迂闊に比較すると公平でないと叱られるかもしれませんが、リチウム電池1kg当たりエネルギーをどれくらい取り出せるかを考えると、効率は 10^{-12} ぐらいになります。揚水ダムは、高低差1,000mとして、 $\sim 10^{-13}$ です。核分裂反応、こころばかり重大な関心を集めている原子炉の熱源、では 10^{-3} の程度です。化学反応と比べると1,000万倍も効率の高いことが分かります。すなわち、必要な燃料の量は火力発電に比べれば原理的には1,000万分の1です。核融合も同程度、あるいは、もう少しいいかもしれません。次に反物質エンジンです。反物質と物質を消滅させますと全てがエネルギーになり、効率はほとんど1で、核分裂・核融合反応のさらに1,000倍です。わずかな量で大量のエネルギーを生み出せるので、遠くまで行く宇宙船の燃料に最適であるという発想が生まれるゆえんです。一方、先ほども申し上げましたように、手頃な場所に反物質が蓄積されているかについては期待薄です。そうしますと反物質を作るのにどれくらいのエネルギーが必要か、燃料合成にかかる効率がどれほどかということが、反物質エンジンの成否を決定します。後で簡単に御説明しますような方法で反陽子を作ろうとしますと、反陽子を生成するのに必要なエネルギーは放出されるエネルギーの1,000万倍にも達することが分かります。これは大変です。

次に1gの反物質があるとどうなるかを考えましょう。これを消滅させるのに1gの物質が必要で、全部で2g消えることになります。エネルギーに換算すると 2×10^{14} Jぐらいになります。100万kW級の発電所の場合ですと、例えば福島第1の大きいほうの原発1基が75万kWですが、2日分の発電量に対応します。何年前かに『天使と悪魔』という映画があったのをご記憶の方もおいでかと思いますが、反水素あるいは反陽子を1/4g

つくり、バチカンを破壊するというストーリーでした。エネルギー量としてはだいたい正しい見積もりがされていたようです。

世界の電力使用量も調べてみました。先ほども話がでしたが、1年間で 10^{20} J程度です。すなわち、反物質1gの消滅は、世界の電力消費量の1分ぶんに該当します。もし反山崎をつくることができますと、1.5カ月程度世界を照らすことができます。世界が1.5カ月ももったらすばらしいと思いましたが、同時にむなしいとも思えて、やはり消滅するのは止めようかと・・・(笑)。

ここで簡単なクイズです。反陽子が発見されたのは1955年のことでした。すでに半世紀以上前の話ですが、いまに至るまでに人類がつくった反陽子の量はどれくらいでしょう？答えはコーヒー1杯も温まらない程度です。先ほどのバナナで言うと、1/10本ぐらいに対応します。本当にわずかなものです。逆に、1gの反物質を生成してバチカンを爆撃したいと思ったら、世界の消費電力10年分ぐらいを反物質づくりだけに当てるはめになります。これは不可能ですね。したがって、反陽子の話はすごくおもしろいのですが、そういうエネルギー供給に関わる有用性/危険性は、良くも悪しくも全くありません。ときどきそんな危険なことに首をつっこんで大丈夫かと心配される方がお出でになります。が、今後の技術レベルの進捗に関わりなく、自然法則によって決まる基本的な制限のため、ご心配はご無用です。

そうはいいいまでも、基礎物理学的には大変興味深い研究テーマが様々にあります。今日はその一端をご紹介したいと考えています。まずは反粒子の登場物語で、様々なドラマがありました。反粒子というのは、ディラックという天才物理学者によって予言されました。実は前世紀の初め頃にミクロの世界をみ

ごとに説明できる量子力学ができ上がったのですが、当初の理論的枠組みはすべて非相対論的でした。相対論への拡張は多くの物理学者が挑戦したようですが、いずれも失敗に終わり、ついにディラックの登場となります。

図3はディラックが相対論的電子論を編み出したときの考え方を極手短にまとめたものです。はじめの式が相対論的エネルギーと運動量の関係です。mは質量、cは光の速さ、pが運動量で、質量×速さの様な量です。もし運動量ゼロ(p=0)、すなわち運動していなければ、 $E=mc^2$ であるという有名なアインシュタインの式が得られます。ディラック先生は、平方根が付いているとやりづらいので、まず両辺を2乗し2番目の式に書き換えました。さらに、1次の関係が望ましいとして、これを“因数分解”しました。不思議な話ですが、論文にちゃんとそう書いてあります。さて、どのように因数分解できるかが問題です。例えば x^2-a^2 は簡単で、下から3番目の式のようにになります。 x^2+a^2 と足し算になっているとちょっと面倒ですが、虚数を使うとやはり因数分解できて、下から2つ目のようになります。ところが、いまやりたいのは2乗が三つある $x^2-a^2-b^2$ というものです。どうやってこういうことを考えついたのかはよくわからないのですが、ディラックは、

反粒子の登場:ディラックの相対論的電子論

相対論的な運動エネルギーは

$$E=\sqrt{(mc^2)^2+(cp)^2} \xrightarrow{p \rightarrow 0} mc^2$$

平方根は面倒なので

$$E^2-(mc^2)^2-(cp)^2=0$$

一次の関係が望ましいので因数分解したい

$$x^2-a^2=0 \rightarrow (x-a)(x+a)=0$$

$$x^2+a^2=0 \rightarrow (x-ia)(x+ia)=0$$

$$x^2-a^2-b^2=0 \rightarrow (x-\alpha a-\beta b)(x+\alpha a+\beta b)=0 \quad (\alpha, \beta: \text{行列})$$



図3 ディラックの相対論的電子論の考え方

a と β を係数として $(x - a a - \beta b) (x + a a + \beta b)$ と強引に因数分解し、そのとき a と β がどういう量であればいいかを考えました。そうするとこの a と β は 4 行 4 列の行列であることがわかりました。ディラックはこれが正しい相対論的量子論であると結論したわけです。日本人で 2 番目のノーベル賞受賞者である朝永振一郎先生の教科書には、「アクロバットのようにして相対論的量子力学を導いた」と書いてありますが、本当にアクロバットのようなのです。

しかもこのアクロバットで導かれる方程式は、電子は大きさが無いのに自転していて、それによってスピン（角運動量）を持つこと、その大きさが正しいこと、さらに、自転しているのが荷電粒子であるため、小さな磁石（磁気モーメントを持っている）であり、実験と一致する強さを持っていることなど、それまで全く説明のできなかった様々な実験事実を自動的に導いてしまいました。1928年のことで、ディラックは若干26歳でした。文字通り画期的な仕事をしたわけです。

ところで、この因数分解の作業は、平方根を取るのと類似の作業で、結果的にプラス、マイナス両方の解が出てきてしまいました。したがって、ディラックの相対論的電子論はすばらしいものだったのですが、負のエネルギー状態というなんとも理解に苦しむ解が出てきてしまいました。ディラックの最初の論文には、これは非物理的で不要なもので、自分の開発した相対論的電子論がなお近似的なものであるためだとしています。

しかし、1930年になると、少しトーンが変わってきました、負のエネルギー状態は存在するが、はじめから全部電子で埋まっていて、そのためわれわれには見えず、何もないに等しいのだという言い方になります。これをディラックの電子の海と呼びます。で、これが本当ですと、負のエネルギー状態に充滿している電子を正のエネルギー状態へたたき上げることができるはずで、そうすると、正エネルギー状態に電子が一個生まれ、負電荷の

電子が抜けるので、残ったすきま（空孔と呼ばれます）は正電荷を持った粒子一個が生まれたように見えるだろうと考えることができます。これは粒子-反粒子の対生成ですね。そこでディラックは、実験屋にはまだ知られていないけれども、反電子という正電荷を持った粒子が存在するはずだと、負エネルギー解をより積極的に評価するようになります。1931年のことです。同時に、反陽子も存在するはずだと、さらに踏み込んだ発言もしています。最初是否定的だったのに、2、3年の間にどうしてこんなに意見が変わったのかはよくわからないのですが、ある伝記には、ディラックの理論があまりにもみごとなので、周りの仲間がずいぶん厳しいことを言いました。まあやっかみもあったのですが、うるさい人がたくさんいたようで、実際存在もしない負のエネルギー解がある様な方程式は不完全でだめだと、パウリなどの偉い人たちに指摘され、ディラック先生も黙っておれなくなったという側面もあったようです。

さて、宇宙線を研究していたアンダーソンという実験物理学者が米国にいました。実験装置の写真からはなんだかえらく汚く見えるのですが、当時としては最新の1.5Tという強い磁場が出せる磁石を用い、放射線が通過するとその軌跡の見えるウィルソンの霧箱を磁石の間に置いて、宇宙線を観測していました。これは上空を飛んでいるだけではほとんど見えない飛行機も、飛行機雲をつくと容易に確認できるようになるのと同じ原理で、目に見えない放射線が見えるようになるというまさに魔法の箱でした。これに磁場をかけておくと、“飛行機雲”の曲がり具合と軌跡の濃さを組み合わせることによって粒子の質量やエネルギー、電荷を決めることができるとアンダーソンは考えたわけです。

アンダーソンの論文に載っている写真を図4の右側に示します。さて、軌跡を見ただけでは粒子がどちらから入射したかは分かりません。そうすると軌跡が曲がっているからといって正の粒子か負の粒子かは区別できない

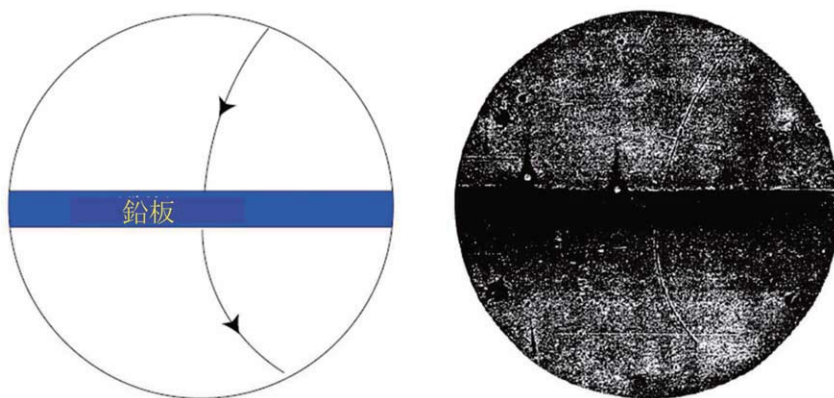


図4 はじめて観測された陽電子

わけです。アンダーソンが偉いのは、霧箱の中央付近に鉛板を入れたことです（図4の左図参照）。こうしておく、鉛板を通った後のエネルギーは下がるので、より強く曲げられることになります。この写真は明らかに上から入って下へ出ていった場合ですね。で、どちら向きに走ったかがわかると、磁場の方向が分かっていますので、観測された宇宙線/放射線がプラスの電荷を持っているかマイナスの電荷を持っているかがわかります。鉛板を通過する時、どれくらいエネルギーを失ったかで、粒子の種類もそれなりに分かります。

そして、1,300枚の写真を撮りました。いまのデジカメのようにパシャパシャと撮れるわけではなく、一枚撮る毎に写真乾板を入れ替え、何時飛んでくるか分からない宇宙線を待ちつつ神経をずっと緊張させて霧箱をにらみ、軌跡が見えた瞬間にシャッターを押して、を繰り返す大変な作業だったのかと想像されます。で、とにかく1,300枚撮った。そうしましたら、変なのが15枚見つかりました。論文には、電荷は陽子の電荷と同じくらいで、陽子よりずっと質量が小さいように見える粒子が見つかった、と遠慮がちに書いてあります。これが人類初の反粒子、陽電子、の発見です。

おもしろいのは、ディラックの研究室の隣はラザフォード散乱で有名なラザフォードグ

ループの研究室でした。そこでもアンダーソンと似たようなことをやっていて、どうもこの陽電子に対応する現象も観測にかかっていたらしいのです。が、研究室間の交流もあまり無く、ディラック理論を知らなかったようです。これでラザフォードの研究室はノーベル賞を一つ逃しました。実験家と理論家の交流は大事ですね。

私は、アンダーソンもディラックの理論を知らず、しかし偶然に同じ時期に“機が熟して”反粒子が理論・実験の両面からわれわれの前に姿を現したのだと思っていました。が、ディラックの伝記を読んでいますと、当時オッペンハイマーは既にアメリカに渡っていました。戦争直前のきな臭いあたりで、アンダーソンはそのオッペンハイマーからディラックの空孔理論を習っていたらしいのです。が、自分の観測とは結び付かなかったのですね。だから知っていることと、身につくこと、“腑に落ちる”こととは違うのですね。天才級の人たちでも、やはりそういうことがある、というのは印象深くなにやら唆唆に富む良い話だと思っています。こうして陽電子が見つかりました。論文は1933年ですが、実験は1932年です。ディラックが反電子の存在を予言したのは1931年で、本当にすごい偶然です。

一方、反陽子に関しては、周到な計画を立てて大きな加速器をつくり、実験装置を準備

することで、発見に成功しています。1955年のことで、チェンバレン、セグレ、イブシランティスという人たちの研究です。反陽子について、1958年には反中性子が見つかり、さらに反重陽子、反ヘリウム3、そして昨年(2011年)には反ヘリウム4も発見されました。粒子と反粒子はペアで生成され、ペアで消滅する。ビッグバンでは、そのように物質と反物質、粒子と反粒子が等量生成され、その後、多くがやはりペアで消滅したと考えられています。一方、われわれの住んでいる世界は物質だけのように見えます。これはどういうわけだろうというのが素朴な疑問です。

ビッグバンが本当で、反物質と物質が等量生成されていたら、反物質が地上では見つからないにしても、遠い宇宙から真空の中を旅して地球にたどり着いてもいいはずだと考えた人がいました。これは良い意味で物理屋のすごいところだと思います。で、もしそういうことなら上空の空気が薄い所で観測して見てみようと思った。そのために、通常は重い超伝導磁石を改良し、できるだけ軽くして粒子検出器と組み合わせて気球に乗せ、どんな粒子が飛んでくるかを観測しました。発想がまっすぐで、子どものように素直ですね。大変興味深いことに、反ヘリウムはまだ一個も見つかっていません(反陽子はいろいろな原子核反応でできるので指標にはしづらい)。気球は比較的短時間で地上に戻ってきます。そこで、観測時間を大幅に増やそうと、人工衛星を用いた実験が始まりました。2011年にはAMS-02という2号機が打ち上げられましたが、まだ観測結果は公表されていません。間もなく何らかの発表があると期待されます。反ヘリウムが見つかるか、大変興味深いワクワクする瞬間が迫っています。

さて、いま申し上げた話は、地球の外側から反粒子が飛んできていないように見える。要するに、どうもこの世界は対称にできていないように見えるということです。もう一つ一寸違った観点から思考実験をした人がいます。われわれの周りには反物質はないけ

れども、遠くには反物質の星雲なり宇宙なりがあって、宇宙全体は物質と反物質のパッチワークになっているとしたらどうなるだろうという思考実験です。もしそういうことになっていますと、パッチワークには必ず境界がありますので、その境界では物質と反物質が消滅するようになります。パッチワークの大きさによって物質と反物質の接する面積が変わるので、消滅の量も変わり、宇宙から来る光(γ 線)のエネルギースペクトルが影響を受けるだろうというわけです。これも素直な発想ですね。で、実際に計算が実行されました。この計算にどの程度の仮定が必要か私はちゃんと把握していないのですが、計算結果と実際に観測されている γ 線のエネルギースペクトルを比べることにより、パッチワークの大きさは現在知られている宇宙のサイズと同程度だという結論が得られています。こちらからのアプローチでも、反物質の宇宙がどこかに隠れているということはなさそうなのです。

これは困りました。一番はじめに、これまでのところ物質と反物質は同じ性質を持っていると思われていると申し上げましたが、どうも怪しいかも知れない。もしかしたら性質が違うのではないかという疑念が湧いてきます。これを物理ではCPT対称性が破れていると言います。例えば重力があるとCPT対称性が破れる可能性があると言われていました。われわれはCPT対称性が保存されているかどうかを反水素と水素を比較することでテストしようと考えています。ずいぶん本題に近づいてきました。

さて、このCPTとは何かです。CはChargeで荷電共役、粒子を反粒子に移す操作を意味します。PはParityで空間反転、鏡の中の世界に移る操作です。Tは時間反転で、時間の進行を逆転させる操作を意味します。例えば、われわれの世界と鏡の中の世界で物理法則が同じであればP対称性があると言います。

ここでは比較的わかりやすいP対称性、鏡の中の世界、に関して例をご紹介します。濡

れた傘をぐるぐると回すと、水滴が飛び散ります。傘の軸を鏡と平行に置いて、この回転の様子を鏡に映したところを想像しましょう。傘の回転方向は鏡の中でひっくり返りますが、飛び散っている水滴の場合は鏡の中でも横のものは横へ、上へ飛んだものは上へ飛んでいます。ので、もしこの飛び散り方が回転軸の垂直方向の上と下で違っていると、鏡の中の世界とわれわれの世界が違うということになります。もちろん傘から飛ぶ水滴は、回転軸と垂直の平面上を飛んでいて、鏡の中でも外でも区別が付きません。

実際このP対称性が保存しているかを確かめようとした人がいます。1957年のことです。コバルト60という放射性同位元素の原子核は回転している（電子と同様スピンを持っている）のですが、この回転の向きを揃えておいて、原子核崩壊で放出される電子（ β 線）の角度分布を観測し、これが回転軸の上と下で異なっていることを示しました。P対称性の破れについて可能性を指摘した理論家はノーベル賞を授与されたのですが、この実験をしたウーさんはもらえなかった。物理は実験の学なのですが、どうも理論を重視する傾向が強いように思え不満です（笑）。このようにベータ崩壊ではPは保存しません。鏡の中の世界はこちらの世界と異なる現象があるというわけです。同様に、CP、反粒子に移って鏡の中を覗くという操作をしても、中性のK中間子、 K^0 とその反粒子である $\bar{K}^0$ に関しては保存しないということが実験的にわかっています。この発見はそれこそ2008年の小林先生、益川先生のノーベル賞につながっていくわけです。

Pは破れていた、CPも破れていた、というわけで、残っているのはCPTです。重要なことはPもCPも実験で明らかにされるまでは保存していると信じられていたのだが、実験したら破れていることが明らかになったということです。多くの物理学者は、CPTは保存していると信じていると思いますが、やってみるまでは分らないと、われわれは

考えています。

さてCPTがどんなときに破れているかについて、何らかの予測をすることは容易ではありません。が、重力がすごく強いところでは破れている可能性があります。というわけで、次にすこし重力を話題にします。

その前にもう一つ興味深い話にふれておきます。われわれのすむ宇宙のエネルギー／物質がどういう成分で担われているかです。少し前までは夜空に光る星が主な物質質量、従って、エネルギーを担っていると信じられていました。が、実はこうやって目に見えているのは全体の0.5%しか無いようです。ガスと宇宙埃がその10倍近くあってほぼ4%です。埃が輝く星の10倍もあるというのもなんだか象徴的です。それからニュートリノという、この前、光より速く走りはじめてやめた粒子がありますが（笑）、あれが0.3%。この数%がこれまで大成功を取めてきた物理学が把握している全てです。あとは暗黒物質、および、暗黒エネルギーと、よく分からないので、なんだか怪しげな名前をつけて呼ばれています。

例えば渦を巻いている銀河の写真をご覧になったことがおありかと思いますが、ああいうかたちでねじれてぐるぐる回するためには、見えている物質だけでは不十分で、これに加えて暗黒物質がないと困ることが分かっています。それが図5のように通常の物質量の5倍、25%もあります。暗黒エネルギーはさらに未知ですが、宇宙全体がなお加速膨張していることが分かかってきて、これを説明するために必要となるエネルギーのことで実に全体の70%に達します。図5にその様子をまとめました。このように把握できているのは全体の僅か5%程度です。われわれは文字通り井の中の蛙で、これまでに知られている物理法則はかなり怪しいという傍証と考えることもできます。

さて、重力の話につなげたいために図6のように、ものの大きさと密度の関係を絵にしてみます。それぞれ対数表示で、横軸は60桁、縦軸は120桁あります。こういう“希有壮大

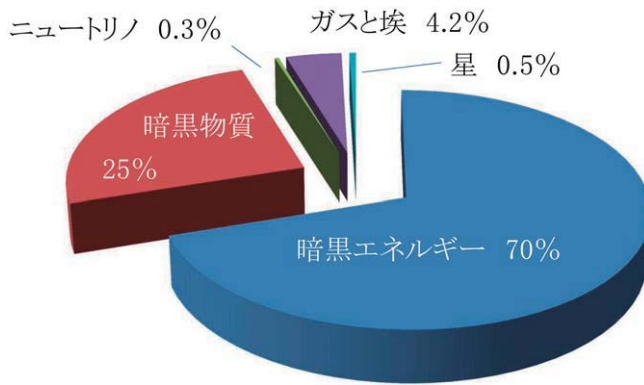


図5 宇宙のエネルギーの構成要素

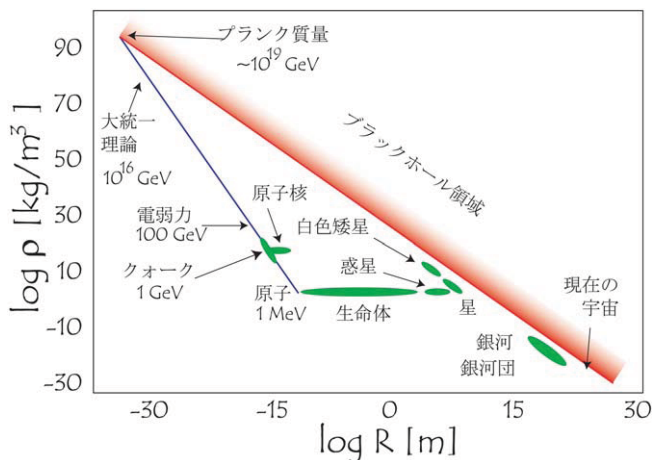


図6 様々な物質のサイズと密度の関係

な”図を書きますとわれわれの知っているものを全て収めることができます。われわれの想像力は対数にしたら、たかが100前後に限られているのだというシニクない方もできません。少し想像力を働かせると、ものすごいことを一枚の絵に収める方法をわれわれは持っているのだというふうに考えることもできます。例えば、原子があって、生命があって、惑星があって、というあたりの大きさにして100京倍ほどもちがう広い範囲にわたって密度はほぼ一定です。これは原子をいくら集めても通常の圧力だと密度に大きな変化はない、すなわち液体や固体は圧縮できないという良く知られた事実に対応しています。原子の大きさを決めている電子を引

っぱがしますと、大分小さくなって“原子核”と書いたあたりに達します。

ここで量子力学を考慮に入れてみましょう。量子力学というのは奇妙なもので、重いものほど小さいということを主張します。もう少し定量的にいきますと、粒子の大きさを a 、質量を m としますと、 $a \sim h/2\pi mc$ で与えられるというわけです。ここで h はプランク定数です。そうしますと、その粒子の密度を考えることができ、 $\rho \sim m/a^3 \sim h/2\pi ca^4$ と粒子の密度は大きさの4乗に反比例することが分かります。図6の青い直線がこれに対応します。ところで、一般相対性理論は、物質の密度が大きくなると重力が強くなり、ついには光も脱出できなくなるブラックホールになることを結論します。その条件は、 $\rho \sim c^2/Ga^2$ で与えられます。 G は重力定数です。図6の赤い直線がこれに対応します。この二つの線は勾配が違いますので一点で出合

います。この出合う点の付近は、重力が非常に強いということです。これを重力の強さをはかる目安とすることができます。この点に対応する質量はプランク質量と呼ばれていて、 $m \sim (hc/2\pi G)^{1/2}$ で与えられます。勿論、大きさに言い直すこともできますし、密度で言うことも可能です。 a/c から時間になおすこともできて、 10^{-43} 秒となります。一番はじめにできたこれより以前は分らないと申し上げた時間はこういう由来をもっています。

プランク質量はエネルギーに直すと $\sim 10^{19}$ GeV です。最近、ヒッグス粒子が見つかったと大騒ぎになっているLHCという加速器がありますが、 10^{19} GeV はLHCで達成可能なエネルギーより1京倍ほど高いエネルギ

ーになります。LHCはすでに山手線ぐらいの大きさになっていますが、地球の半径は6,000km程度しかありませんので、建設予算が膨大になることをとりあえず気にしないことにしてもこのサイズの加速器を地上に建設することはいずれ不可能です。

図7はイラストではなくて、実際に弾丸がリングを貫通した直後どうなったかという瞬間を捉えた写真です。前後に粒子が吹き出しており、どんなものがどういう風に飛んででてくるかを詳細にしらべるとリングの中身がどうなっていたかが分かります。エネルギーの高い粒子をぶつけて何か新しいものが見えないかと調べる高エネルギー実験というのは、言ってみればこういう研究方法です。できるだけエネルギーを上げることで小さな領域を見るというのが作戦ですが、プランク質量の領域にたどり着こうとしても、先にご説明しましたように加速器でこのエネルギーに達するのは不可能です。

そこで何か質的に違う作戦を考える必要があります。一つの可能性は、ガツンと乱暴にひっぱたくことはやめ、そっと見るのはどうか。その代わり思いきり目を凝らして精度高く見る。実際、精度高く見ようとするとガツンとやっては元も子もなくなりますのでそっと時間をかけて見る必要があります。ここにも量子力学がでてきます。エネルギーと時間の間には不確定性関係、 $\Delta E \sim \hbar / 2\pi \Delta t$ 、があり、エネルギーを精度良く決めようとする

と観測時間 Δt を長くしないといけないというわけですね。この精度高く見るというところで次の香取先生のお話とつながるのですが、そのようにそっと耳を傾けることを「自然の囁きを聴く」というポエティックな言い方で呼んでいます。ここまですと反水素は目の前です。冷たい反水素を用意して、どんな顔をしているかを乱暴にのぞき込むのではなく、どんなことを言うかをそっと聴きに行こうというのがわれわれの作戦です。

次はなぜ反水素かを少しご説明します。反水素はまず一番簡単な反物質です。反ヘリウム原子などはまだまだつくることができません。やっと裸の反ヘリウム原子核が発見されたばかりです。そこで、一番簡単な反水素を詳細に眺め、水素と比較したい。大変具合がいいのは、水素というのは最も簡単な原子で、これまでに非常に高い精度でその性質が明らかにされていることです。で、水素も反水素も光を出しますので、どんな光を出すかを観測すればよい。1S-2S遷移は一番エネルギーの低い（陽）電子遷移ですが、これはレーザー一分光で実現できます。また陽子や電子、反陽子や陽電子もそれぞれ小さな磁石なのですが、その磁石の向きが互いに平行か反平行かでエネルギーが少しだけ違います。その間の遷移を超微細遷移といいます。このエネルギー差を測るのがもう一つの手です。このときの遷移エネルギーはマイクロ波の領域なので、マイクロ波分光をすることになります。

CPT対称性とは一寸趣の異なる研究テーマですが、反水素を用いた重力の実験が最近話題になっています。既に二つの研究計画があり、いずれも認められて実験準備が進んでいます。リングが地球に向かって落ちるとするのは例のニュートンの話で、図8の左端の図に対応します。で、反リングと反地球を用意して、ここでの落ち方がリングと地球の場合と同じかどうかを調べると、これはCPT対称性テストになります。ところが、上の二つの研究計画が目指しているのは、反リングと地球との間にどのような力が働くかです。

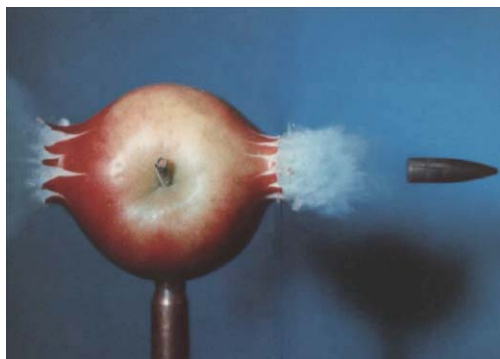


図7 弾丸がリングを突き抜ける瞬間を捉えた写真

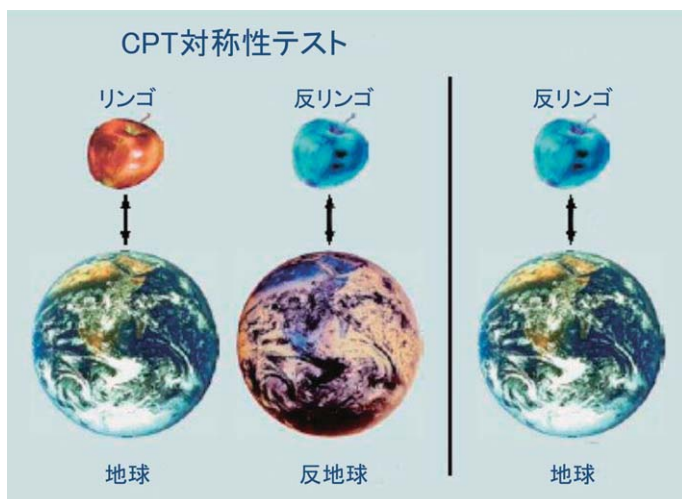


図8 反物質を用いた重力実験とCPT対称性の関係

これは全く新しい別の研究テーマになります。具体的には反リンゴの代わりに反水素を使うわけですが、反物質と物質の間の重力相互作用がどうなっているかを明らかにできるはじめての研究になっています。

さて、実際に囁きを聴きに行くとして、われわれの耳は十分鋭いかが問題です。そこで、これまでどんなことがわかっているか、分かっているかを確認しておきます。電子と陽電子の間では、質量、電荷の大きさは1億分の1、磁石の強さは1兆分の1ぐらいの精度で互いに一致することが知られています。大変な精度です。一方、陽子と反陽子のペアを見ますと、質量、電荷は10億分の1ぐらいとやはり大変高い精度で一致していますが、磁気モーメント（磁石の大きさ）はたかが1,000分の1の精度でしか知られていません。これは狙い目です。われわれはまずこのあたりを突破口にしたいと考えています。以下にご紹介しますわれわれの研究方法ですと、100万分の1から1,000万分の1ぐらいの精度で陽子と反陽子の磁気モーメントの違いを調べることができます。

一方、水素の1S-2S遷移に目を移しますと、その実験精度はすばらしく、1,000兆分の1、10Hzの精度で決定されています。香取先生

の時計の精度はさらに高いという驚異的なものですが、とにかくこういう量です。一方、理論はよく分からないことが多く、実験結果の再現は1,000億分の1、10kHz程度にとどまっています。理論というのはわれわれが物事をどれくらいよく理解しているかを示す指標ですので、逆に言うところの先にわれわれの知らない不思議な物理現象が潜んでいる可能性があります。水素の超微細遷移に注目しますと、相対精度は10兆分の

1と1S-2S遷移より悪いのですが、絶対精度では 10^{-4} Hzと1S-2S遷移より 10^5 倍も高い精度で測定されています。が、理論的には6桁で、やはり10kHz程度しか押さえられていません。この先に何が待っているか、大変興味のあるところです。なお、反水素を用意し、1S-2S遷移なり超微細遷移なりを実験で測定し、水素の分光結果と比べるという研究は、通常の高精密実験とは異なり、理論の詳細は必要ありません。とにかく測定し、水素と僅かでも違っていたら、それはとりもなおさずCPT対称性が破れていることに対応しているからです。しかも反陽子の磁石の強さ（磁気モーメント）は3桁の精度でしかわかっていけませんので、これは勝負のしがいがあります。

さて、CPT対称性のテストに1S-2S遷移と超微細遷移のどちらがより適切かは真剣に考えるべき問題です。これには原理的な問題と実験装置的な問題の二つの側面があります。ここでは結論だけ申し上げますが、現在の反水素合成・捕捉法では、理論精度を超える精度で1S-2S遷移を測定することは不可能ではないにせよ非常に困難です。捕捉に必要な強い不均一磁場により分光精度が大幅に制限されるためです。一方、超微細遷移のほうはビームとして引出し、磁場の影響を受けないよ

うにしてマイクロ波分光しますので、理論精度を超える実験が可能だと考えられます。

というわけで冷たい反水素が手に入ればよいということになります。ところが、その材料である反陽子も陽電子も自然界には存在せず、人工的に作る必要があります。特に反陽子が問題で、現時点ではヒッグス粒子を発見したことで最近マスコミにもよく取り上げられているCERNという研究所でしか供給されていません。そのため、反水素実験を目指す研究者は世界中からCERNに集まっています。

図9にCERNの加速器群の模式図を示します。図左下のイオン源から出発した陽子は、まず図のLINACで加速され、プロトンシンクロトロンブースター（PSB）をへて、プロトンシンクロトロン（PS）と3台の加速器により25GeV（250億電子ボルト）まで加速された後、イリジウム標的に入射されます。この衝突で生成される高エネルギーの反陽子（中心エネルギー2.5GeV程度）を、図のAD（Antiproton Decelerator反陽子減速器）と呼ばれるレーストラック型の減速器に捕まえています。

さて、高エネルギーの陽子が標的とぶつかりますと、

$$p + p \rightarrow \bar{p} + p + p + p \quad (1)$$

といった原子核反応により、反陽子が生成されます。ここでは $\bar{p}$ は反陽子を意味します。生成された反陽子の速度分布は大きく広がっており、そのまま減速すると四方へ飛び散ってしまいます。ので、まずは速度分布を何とか狭くして（これをビームの冷却と呼びます）、その後おもむろに全体を減速して、再び冷却して、ということを繰り返し、エネルギーを1/1,000くらいまで下げた反陽子ビームを生成し、これを各実験グループに供給しています。このビーム冷却技術によりW中間子の発見が実現され、これを開発したファンデアメルはカルロルビアとともにノーベル賞を受賞しました。

冷却され減速された5MeVの反陽子ビームは、われわれがCERNの加速器グループと共同で開発した高周波四重極減速器によりさらに減速され、100keV程度のビームとした後、超伝導ソレノイドコイル中に用意したトラップに捕まえ、電子と混合することでさらに冷却し、10K（-263℃）付近の冷たい反陽子の塊を得ています。生成されたときのエネルギーと比較すると実に10兆分の1程度まで冷却されたことになります。

こうやって徹底的に冷たくした反陽子に、やはり冷たくした相棒の陽電子を“まぶす”ことで、反水素を合成します。

実験の日々を少しだけご紹介します。ADは夏を中心とする六ヶ月間、一部のメンテ日を除いて土日無しで稼働しています。これに対応し、実験側も、土日無しで毎日8時間ずつ、朝7時から15時まで、15時から23時まで、23時から7時までの3つのグループにわかれて実験をしています。あ

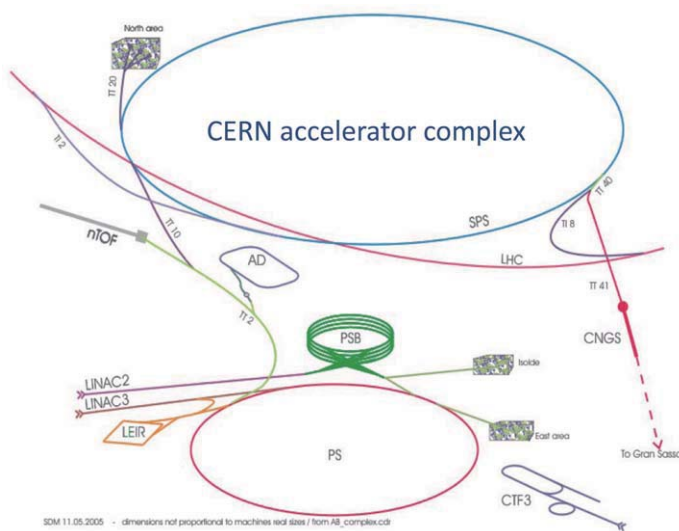


図9 CERNの加速器群

る意味大変規則的で単調な生活になります。思考パターンも単調になってきます。ふと修道士は時にそのような感覚を持つのではないかと思ったりしました。また、そのために、多くの宗教では修行に肉体労働も併用することで、精神の活性と安定性を確保しているのかとも思いました。特定のグループがいつも深夜実験というわけにはいきませんので、一週間毎に実験時間を8時間ずらすことになります。毎週3大陸を移動するような生活が毎年数カ月続くわけです。夕方に起きだして、月の満ち欠けを確認し、まぶしい朝日とともに宿舎に帰るということもよくありました。

このようにして冷たい反陽子を用意し、いよいよ反水素を合成します。冷反水素をつくるには反陽子と陽電子をそっと混ぜないといけませんが、電荷が逆です。例えば、一様な磁場中では、荷電粒子は磁力線の方にしか動けません。そこで、磁力線にそって図10のような電位配置を与えま

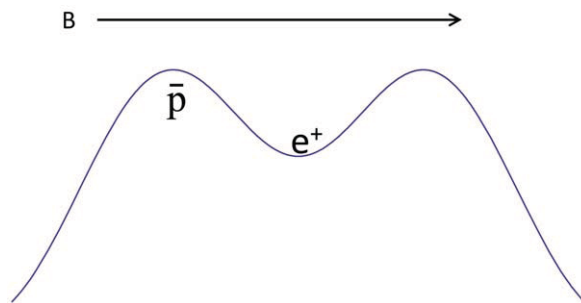


図10 入れ子ポテンシャル中の反陽子と陽電子

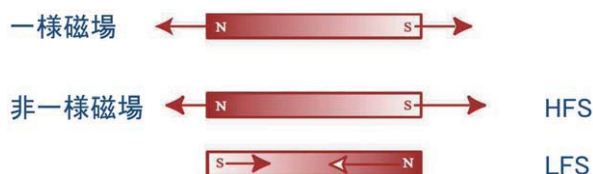


図11 磁場中に置かれた棒磁石に働く力

ことは、それぞれの安定点付近からほとんど動かない、ということですので、両者は分離したままで、反水素は金輪際できません。従って、何らかの方法で混ぜないといけませんが、そのためにはエネルギーを与えないといけません。が、乱暴にしますとたちまち温まってしまって、冷たい反水素ができなくなる、というジレンマがあります。そこで、とにかく温めないようにしながら反陽子と陽電子を混ぜ合わせる手法を様々に開発しました。詳細にわたる、しかし、重要な技術開発が幾つもあるのですが、その辺は時間の関係で割愛します。そんなこんなで、何とか反水素ができあがります。

ところで、反水素は水素と同様中性ですので、電場には反応しません。何か操作する方法を考えないと、できあがった端から飛び散ってしまいます。自然は往々にして僅かながら可能性を残してくれるものですが、反水素の場合は、これが小さな磁石であることがキーになりました。図11の上の図のように、一様な磁場中に棒磁石を置いた場合を考えま

す。このとき、N極に働く力とS極に働く力は大きさが同じで反対向きですので、磁石は全体として動きません。一方、真ん中の図のように、不均一な磁場中に棒磁石を置きますと、N極に働く力とS極に働く力の間に違いが生じ、この場合ですと全体としては磁場の強い側へ引っ張られます。こういう磁石の向きをハイフィールドシーキング (HFS) 状態と呼びます。図11の下の図のように棒磁石をひっくり返しますと、力の向きが逆になり、今度は磁場の低い側に引かれる状態になります。これをローフィールドシーキング (LFS) 状態と呼びます。これを使って反水素をビームとして整えたり、捕まえたりすることが可能になります。

図12はカスプトラップと呼ばれる反水素ビーム発生装置で、動作原

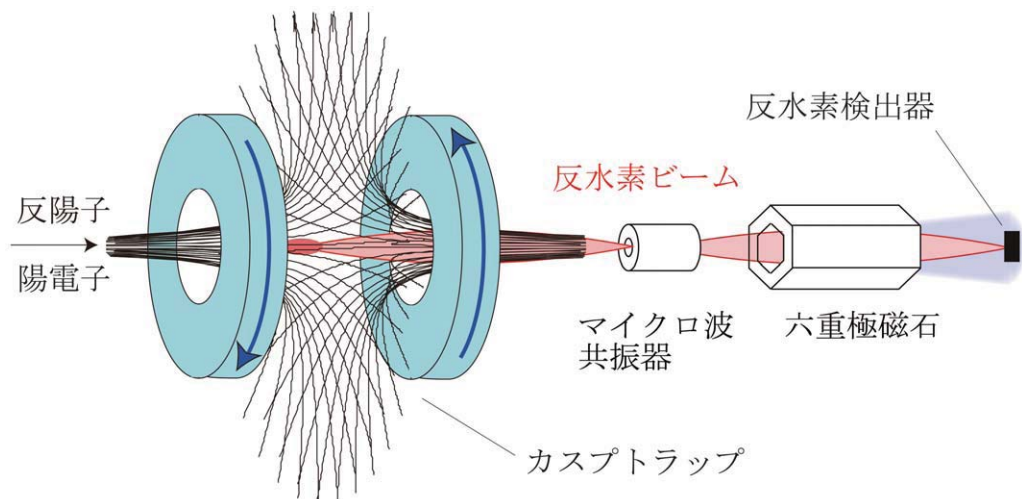


図12 カスプトラップの動作原理

理から実際の実験装置の作成まで、全てわれわれのオリジナルです。超伝導コイルを二つ用意して、反対向きの電流を流します。そうすると、中心ではゼロ、中心からどこへ向かっても強くなる磁場が得られます。軸上の中心から少しずれたところで反水素を合成しますと、LFS状態は中心方向に加速されますが、HFS状態は磁場の強い動径方向に引っ張られて散ってしまいます。このようにしてLFS状態であるような反水素を選び出すことができます。中心部に引き寄せられたLFS状態の反水素はさらに下流に向かいますが、下流のコイルにさしかかったあたりでは磁場が強くなりますので減速され、その後また加速されます。すなわち、カスプ磁場は反水素に対して集束レンズのように働き、LFS状態にある反水素を選択的に且つ密度の高いビームとして取り出すことができます。下流にマイクロ波空洞共振器を置いてマイクロ波分光し、さらにその下流にカスプ磁石、あるいは、6重極磁石を置きますとLFS状態の反水素は、最下流の反水素検出器に向かって集束されます。マイクロ波周波数が超微細遷移の周波数と一致しますと、LFS状態はHFS状態に移り、今度は6重極磁石で発散させられるため、反水素検出器に飛んでくる反水素の数が減少しま

す。このようにして超微細遷移周波数を精度高く決定することができます。

より具体的な実験装置の配置は、図13のようになります。図の左下に反陽子蓄積器が、その上に陽電子蓄積器があり、それぞれ図右上にあるカスプトラップへ反陽子と陽電子を供給します。このようにしてカスプトラップ中で合成された反水素は、その一部が下流(図の右上)へ引き出されることになります。

われわれはこのカスプトラップ法により反水素をつくることにはじめて成功しました。2010年のことです。これは国内よりも国外における評価が高かったのですが、特にPhysics Worldというイギリス物理学会が出している雑誌からは、次にご紹介します反水素を磁気瓶に捉えた実験とあわせて、2010年に発表された全物理分野のブレークスルーの第一位の成果であるという大変高い評価を得ました。最近、反水素を合成するばかりでなく、ビームとして取り出せるようになってきました。いよいよマイクロ波分光を開始する予定です。

冷反水素によるCPT対称性テストのもう一つのアプローチは反水素を長時間捕まえ、これをおもむろにレーザー分光しようというものです。捕まえるためには磁気瓶を用いま

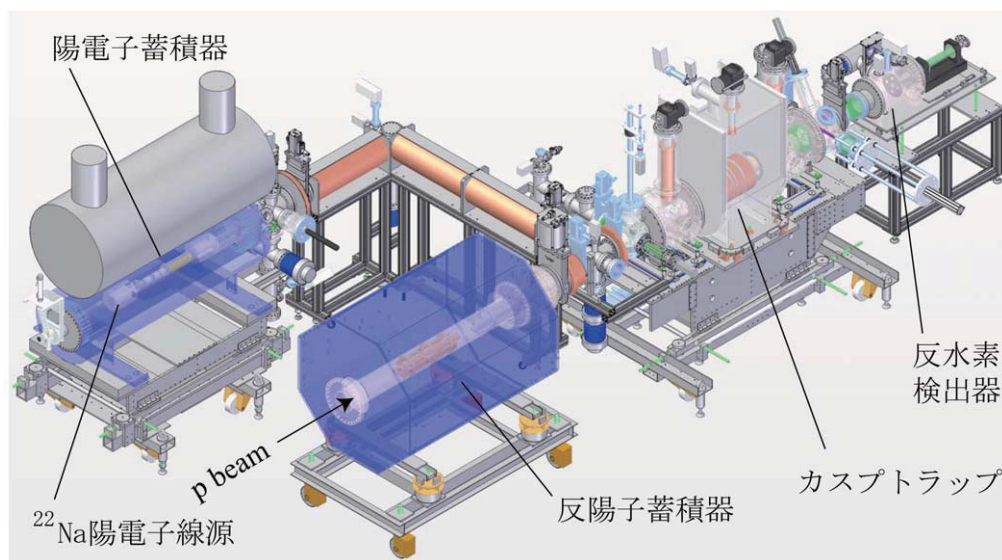


図13 カスプトラップ法による反水素ビーム生成装置

す。空間の一点で磁場が極小になるような磁場配置を用意しますと、図11に示した様にLFS状態の反水素は常に磁場極小の方向に引っ張られ、元のエネルギーが低ければ捕まえることができます。カスプ磁場も極小磁場配置構造なのですが、図14にこれまで通常の原子を捕捉するのに使われてきた四重極磁気瓶の極小磁場生成方法を模式的に示します。先ず円形コイルを二つ用意します。このコイルには同じ方向に電流を流します。そうすると、軸方向では中央で弱くなり、コイルに近づく수록と強くなる磁場分布を得ることができます。さらに、軸に平行に置いた4本のケーブルに図のように方向が順番に入れ替わる電流を流しますと中心軸付近では互いにキャンセルするためほとんど磁場分布に寄与しないが、軸から離れると強くなる極小磁場配置が実現されます。

このようにして磁気瓶への反水素捕捉も2010年に実現されました。図15に実際使われた磁気瓶の構造を示します。これは先ほど原理を説明しました四重極場よりも中心付近での均一性がより高い八重極磁場になっています。これによって、中心軸付近に捕捉する

必要のある反陽子や陽電子の蓄積安定性を大幅に改善しています。外側の3層構造はそれぞれが2次元の検出器で、反陽子が消滅したときに飛び出す複数のパイオンの通過位置を記録し、それを繋ぐことでパイオンの軌跡を推測し複数の軌跡の交点から、反陽子の消滅位置を決定する検出器です。八重極コイルの内側には、円筒状の電極（MRE）がたくさんみえます。これにより、カスプトラップの場合と同様、入れ子ポテンシャルをつくり、反水素の原材料である反陽子と陽電子を安定に閉じ込めています。

このようにして磁場極小位置付近で反水素が合成され、できあがったときの運動エネルギーが十分小さければ、磁気瓶に捕まえることができます。で、捕まっていたことを確かめるためには、磁気瓶の磁場を切り、反水素を束縛から放ちます。そうしますと自由になった反水素は近くの電極にぶつかり消滅しますので、それ以前に捕まっていたことが分かるというわけです。図16に実験結果を示します。横軸は反水素の軸方向の消滅位置、縦軸は磁気瓶を開けてから消滅するまでに要した時間です。色違いの点は電場配置を変えて

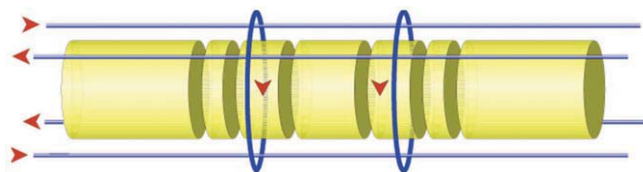


図14 四重極磁気瓶

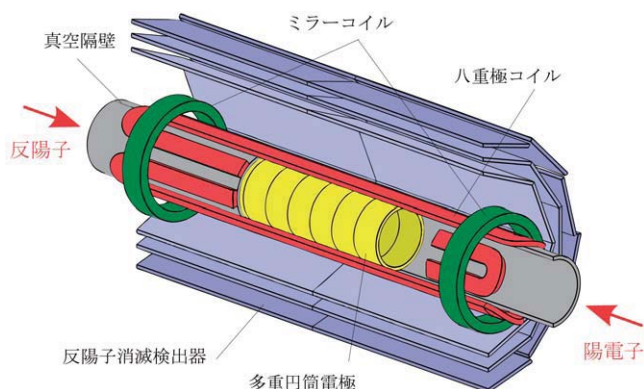


図15 はじめて反水素捕捉に成功した装置の概念図

消滅位置を測定することで、中性の反水素の消滅（裸の反陽子ではない）であることを確かめたものです。また、細かい灰色の点は、消滅位置をシミュレートしたもので、実験結果と良い一致を示していることが分かります。反水素の捕捉実験はこれからいよいよレーザー分光へと推移していくことになります。

以上が、反水素に関わる物語です。最後に少し話題を変えます。反陽子ヘリウムという、反陽子とヘリウム原子核と電子1個の三つが束縛された奇妙な“原子”があります。普通の反陽子と原子が束縛された系は寿命が1兆分の1秒程度と非常に短いとされていますが、この反陽子ヘリウム原子は例外で、その百万倍以上のマイクロ秒もの寿命があり、既に高精度レーザー分光に成功しています。その分光結果を信頼できる理論計算がある場合、それと比較することで、反陽子の質量を電子の質量に対する比として決定することができます。いまや陽子の質量とはほぼ同程度の精度で反陽子の質量が決定されています。今後レー

ザーの分光精度がさらに上がりますと、反陽子の質量を陽子よりも高い精度で決めることができるかもしれません。水素原子、従って、陽子は、この宇宙で最も普通に存在する粒子（数の比では90%以上）ですが、この一番たくさんある粒子より、人工的に作らないと存在しない反陽子の質量が、より正確に決められるというわけです。物理屋さんというのは変なことを考える人たちです。

そろそろまとめです。まず、反物質とわれわれの住む宇宙との関係というお話を少ししました。ディラック理論の鬼子、負のエネルギー状態は、ディラック本人も

捨てるべきだと考えていたのですが、実は、反粒子の存在という、われわれの自然認識を最も本質的なレベルで変え深化する発見でした。その代表格である反陽子、反水素は、いまや生成・操作が可能となり、最も本質的なCPT対称性テストや反物質と物質の間の重力相互作用研究にとって、極めてユニークなプローブになっています。また、時間の関係で割愛しましたが、反水素合成は、大変興味深い原子衝突物理学のテーマを提供します。次に、冷反水素研究の現状についてお話をしました。反水素の操作、捕捉といった技術的レベルが次第にクリアーされ、いよいよその性質を調べる分光実験が目前に迫っています。テーマを「自然の囁きを聴く」と設定しました。これは、基礎物理学の研究がエネルギーをあげることで飛躍的に進んできたという歴史的事実と、一方、既に加速器のサイズが山手線と同程度になっていて、今後この方向でさらに桁をあげていくことに限界が見えてきたこと、同時に、エネルギーを下げて精度を

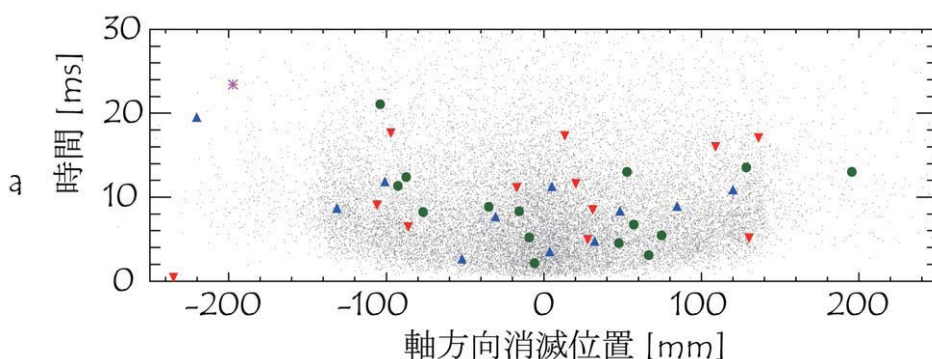


図16 反水素を八重極磁気瓶に捕捉後、磁気瓶を開け、消滅位置と時刻を記録したもの

上げる手法が大きな進歩を遂げており、次の香取先生のお話もそうですが、基礎科学への新しいアプローチ法が拓けつつあるという認識によります。

反物質というのはビッグバンで物質と同量生成され、その後の膨張の過程で全て消滅してもおかしくなかったのですが、わずかに物質が残り、そのおかげで、なぜ反物質が消えたのだろうと頭をひねる生命体が生まれるまでになりました。が、この謎はまだ解けていません。つまり、われわれの存在はなお偶然に支配されていて、いわば不安定なものです。これはラボアジエの質量保存の法則により保証されていた安定な世界観を否定し、われわれの存在を不安定なものにしています。今日

お話ししました反物質研究は、今後の進展によっては、安定した世界観を再び取り戻すのに一役買うことができるかも知れません。

司馬遼太郎に『朱盗』という短編小説があります。王の墓に朱がある。朱は大変貴重なもので、それを盗賊が手に入れようとする。が、地上は墓守が厳重に警護しています。そこで、何世代もかけて遠くからトンネルを掘り、そっと朱を盗もうというお話です。勿論反物質研究の目的は富ではなく、自然の基本的構造に関わる素朴な疑問を解くことですが、アプローチはある意味似ていて、大変時間のかかるものです。われわれのグループに限りましても研究を開始したのは既に十数年前のことになっています。装置にも十数億円の経

費がかかっています。国民一人あたり15円程度の負担を御願ひしていることになります。いまやっと墓の入り口にたどり着いたわけですが（笑）、その価値があると思っていただけましたらたいへんありがたいことです。

本日はご清聴、どうもありがとうございました。



図17 反物質研究は“朱盗”に似ている？