

宇宙の成り立ちと技術社会

高エネルギー加速器研究機構 社会連携部知的財産室長 藤井 啓文

はじめに

「宇宙の生い立ちについて何か書いてもらえませんか？」この話が広報室から回ってきた時、最初、私は理論の誰か適当な人に頼もうと思いましたが、依頼された方が特許庁技術懇話会からなので、知的財産室長である私に回ってきたらしいということがわかりました。そこで、技術の話も絡めた少し違った切り口で「宇宙の生い立ち」の話をしてみようと思い立ちました。

宇宙の生い立ちについては、現在では、すぐれた解説書が多数ありますし、Web上にも解説が多数あります。最も有名なのは1977年に出版されたSteven Weinbergの「The First Three Minutes」(ISBN: 0-465-02435-1)でしょう。宇宙が高温・高密度の火の玉状態から最初の3分間から4分間あたりで現在宇宙に満ちている元素が作られていく過程が可能な限り古典力学的描像で(つまり私たちの日常感覚で理解できる描像で)述べられています。

まずはこの描像の復習から始め、小林・益川理論の検証実験で有名になったCP対象性の破れがどこでどのように絡んでくるのかを述べてみましょう。

予備知識

古典的描像と言っても、高エネルギーの素粒子の話や重力の話が絡んできますので、どうしても「非常識な」部分を入れざるを得ません。ここでは、そのいくつかについて簡単に説明しておきます。

まず高エネルギー領域では粒子が生まれたり、消えたり、別の粒子になったりするという事です。この時、エネルギー保存則は粒子の質量も含めて考える必要があります。静止している粒子の質量とエネルギーの関係は

有名なアインシュタインの式

$$E = mc^2$$

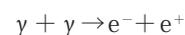
で与えられます。

次に必要なのは、素粒子は粒子性と波動性を持つという量子力学的な描像です。光は

$$E = h\nu$$

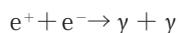
のエネルギーを持つ質量0の粒子(光子)です。

二つの高エネルギー光子から電子と陽電子(反電子)の対を作る反応があります(対生成)。



この時、エネルギーの保存則が働くので、重心系での全エネルギーは少なくとも電子と陽電子の静止質量の和より大きくならなければなりません。電子と陽電子の静止質量は全く同じですので、重心系での全エネルギーが電子の静止質量の2倍以上無ければ上の反応は起こりません。

一方、上の逆反応(対消滅)



は光子の質量が0なので電子や陽電子の運動エネルギーがほとんど0であっても起こります。(全エネルギーという意味では電子と陽電子の質量も含めますから電子と陽電子の静止質量の和より大きいことは自明です)。

大雑把に言えば温度は粒子の持つ運動エネルギーの平均値ですからこのことは、どの温度で反応が起こるか、どこまで温度が下がると反応が止まるかを考える上で重要です。

いくつかの観測事実

現在の宇宙の生い立ちに関する定説ができあがるにはいくつかの観測事実が必要です。ここでは、そのいくつかを述べます。

まず、宇宙の一様性です。我々の見る星空は天の川があり、天の川は星々の集まりであることを知っています。とうてい一様には見えませんが、これは我々太陽系が天の川銀河の中にあり、すぐそばにあるからに他なりません。銀河の大きさよりももっとずっと大きな範囲で見た時、物質密度は極めて一様です。

次に宇宙の元素組成ですが、(我々の地球には様々な元素が存在しますが)ほとんど水素で、残りは(存在比で)10%程度のヘリウム(ヘリウム4)です。重量比で言えば71%の水素、27%のヘリウム、2%程度のその他の元素です。

次に、遠くの銀河ほど速い(距離に比例した)速度で、我々の銀河から遠ざかっているという観測結果です。これは1929年にハッブルが発表して以来、ハッブルの法則として知られているものです。(多くの人が指摘しているように、この論文に掲載されているデータから遠くの銀河ほど速く離れているらしいことは読み取れても距離に比例していると言ってしまうのはどうかと思われるがその後の観測で裏付けされていきます。)

ここで我々の銀河との相対速度を求めるのに使われたのは赤方偏移の観測です。物質からの光のスペクトルは、光を出している物質や、近くにある物質によって固有の輝線や吸収線を持ちます。赤方偏移というのは、この固有の輝線や吸収線が波長の長い方へ(つまり可視光で言えば赤い方へ)ずれる現象です。これは古典論的な意味で光のドップラー効果として理解され(他にも赤方偏移を引き起こす現象はあるので、これだけでドップラー効果というのは早計ですが)、このずれの量を測ることで観測者との相対速度を決めることができます。

さて最も重要な観測は絶対温度2.7度に相当する宇宙マイクロ波背景放射の存在でしょう。これは1965年(観測自体は1964年)にベル研究所のペンジアスとウィルソンにより発見されました。後で述べるように、これはビッグバンモデルで宇宙の初期(といってもビッグバンから40万年ぐらいたった頃)、水素の原子核と電子が結合して水素原子を作った時代、電氣的に中性の粒子(原

子)になることで光に対し透明になり(光は電荷で散乱されます)、その時の光が現在地球に届いていることで説明できることがわかり、ビッグバンの正しさを証明する観測的事実として受け入れられました。

ビッグバンモデル

現在の宇宙の生い立ちの定説はビッグバンモデルです。宇宙は遙かな過去においては火の玉(高温高密度)状態にあり、それが膨張し、冷えていく過程で元素が作られ、現在の宇宙になり膨張は今も続いているというものです。

宇宙の膨張を表すパラメータはハッブル定数として知られています。大雑把に言えばこの逆数は宇宙年齢を表します。反応が宇宙年齢に達しても起こらない程度であれば現在は、その状態が続いていると考えてよいでしょう。温度と反応率の関係がわかれば、どの温度でその反応が止まるかがわかります。

陽子と中性子は非常に高温状態ではニュートリノや電子と弱い相互作用を通じて相互に入れ替わり熱平衡状態を保ちます。この相互作用が止まる温度は大体 10^{10} 度です。この温度に冷えるのは大体1秒です。この時まで熱平衡状態であり、その時の陽子と中性子の比率が固定されるとすると、陽子と中性子の質量差からこの温度で熱平衡状態を保つには陽子が中性子の4-5倍必要になります。

この後、中性子は β 崩壊(半減期15分)で陽子に変わっていきませんが、3分ぐらいたった頃、温度が 10^9 度付近で陽子と中性子が結合して原子核を形成する過程が始まります。つまり原子核の形成が始まる頃には、陽子の比率がもう少し大きくなります。

もう少し詳細な計算で、この比率は大体7:1であるとされています。この過程で安定な原子核はヘリウム4です。全部の中性子がヘリウム4になるとすると、ヘリウム4は2個の陽子と2個の中性子を使いますから、残る陽子は12個となり、水素原子核とヘリウム原子核の重量比は12:4すなわち3:1となります。この状態が現在の宇宙に残っているわけです。

ここから先、次に来る物質構造は原子です。それまでは電子と水素の原子核(陽子)とヘリウム4の原子核がそれぞれ独立に運動し、やがて温度が3000度付近にまで下がると(大体40万年ぐらいかかります)電子が原子

核に捕獲されるようになり原子となります。原子は全体として見れば電氣的に中性ですから、光はほとんど散乱されなくなり直進します（光は電磁相互作用を担うので）。つまり、この頃の光は当時のまま現在まで届くこととなります。ただし、宇宙は互いの距離に比例した速度でお互いに遠ざかっていますので、波長が長い方へ引き伸ばされます（赤方偏移）。この量はどれだけ宇宙が膨張しているかで決まりますから現在の温度がわかれば、この時からの年齢が決まります。

現在観測されている温度は絶対温度2.7度で、宇宙年齢は137億年と推定されています。

この時の光は、それまでの熱平衡状態の残りですから、その分布は黒体輻射になります。宇宙マイクロ波背景放射が非常によく黒体輻射に一致していることは衛星による観測で確認されています。

ここから、原子が集まって星を作り、星が集まって銀河を作る長い長い過程が始まるわけです。

ビッグバンから最初の1秒まで

前の節では、宇宙誕生から1秒付近、陽子、中性子がある世界から始めましたが、その前はどうかという疑問が当然起こります。

当初、素粒子と思われていた陽子や中性子は、その後の研究で複数の（陽子や中性子は3個の）クォークから成ることが確からしいことがわかってきました。確からしいというのは間接的証拠はいろいろあるのですが、単体のクォークは未だに見つかっていないからです。もう一つよくわかっていないのは例えば陽子は3個のクォークから出来ていますが、陽子の質量はこれらクォークの質量の総和よりも遥かに重いのです。つまりクォークから陽子が作られる時に何らかの仕組みが働いて質量を獲得しているわけですが、その仕組みがよくわかっていません。

このような問題はありますが、温度がもっと高い1秒よりずっと前の宇宙では光と電子・陽電子が熱平衡していただけでなくクォーク・反クォークも同じように熱平衡に参加していたと考えられます。陽子や中性子の質量は大体1GeVですから、宇宙温度にして 10^{13} 度付近、時間にして1マイクロ秒付近でクォークが陽子、中性子になったと考えられます。

ところが、ここで厄介な問題が生じます。それまで、

クォークと反クォークは対生成、対消滅で熱平衡を保ってきました。つまり、クォークの数と反クォークの数は常に等しいこととなります。素粒子の標準模型ではバリオン数と呼ばれる保存量があり、反応の前後で保存します。クォークは $1/3$ 、反クォークは $-1/3$ です。陽子や中性子はクォーク3個から成るのでバリオン数が1です。熱平衡状態でクォークと反クォークの反応は対で起こっていますから、バリオン数は0です。バリオン数が保存しない反応はまだ発見されていません。従って、陽子や中性子があるならば、同じ数の反陽子、反中性子が無ければなりません。

ところが今の宇宙には（高エネルギーの粒子から二次的に生成される反粒子を除いて）反陽子も反中性子も見つかりません。

現在のバリオン数が0でない状況を作り出すには以下の3つの条件が必要とされています（サハロフの3条件）。

- (1) バリオン数が反応の前後で保存しない反応があり
- (2) 粒子・反粒子の入れ替え（C変換）及び粒子・反粒子の入れ替えと同時に空間反転する変換（CP変換）に対称性を破り
- (3) 平衡状態にはない

というものです。例えばバリオン数が反応の前後で保存せずに1だけ増える反応があったとしても、粒子・反粒子の入れ替えに対して対称であると、粒子と反粒子を入れ替えた反応、すなわちバリオン数が1だけ減る反応が同じ確率で起こるので、結果的にバリオン数は変わりません。

CP変換に対してはもう少し話が複雑になりますが、同様の議論です。また平衡状態というのは、ある過程があったら、その逆過程が同じ確率で起こるわけですので、今の議論と同様に、バリオン数非保存の反応があっても結果としてバリオン数が0になります。

CP変換に対する対称性の破れは、中性K中間子の崩壊で起こっていることが知られていました。小林・益川理論というのはCP変換に対する破れがクォークレベルで生じるためには、当時知られていた3種類または4種類のクォークではだめで、少なくとも6種類（2種類を対として3世代）必要であること、またその機構を定式化したものです。

この理論ではB中間子と呼ばれる粒子の崩壊がCP変換に対する対称性を大きく破る可能性が指摘され、米国

のスタンフォード線形加速器センターと日本の高エネルギー加速器研究機構とで実験が行われ2001年、その大きな破れの観測に成功しました。これにより小林・益川理論の正しさが実験的に証明され、2008年のノーベル賞につながりました。

これは、宇宙のバリオン数の問題で言えば、まだほんの一步を踏み出したにすぎない状況です。しかし、この成功を足がかりに標準理論を越える様々な理論が展開され、次の実験的・観測的証明を待っています。

ビッグバンより前の宇宙

宇宙の生い立ちがビッグバンモデルでどのように語られるか述べてきました。多くの観測量がビッグバンモデルで得られる値と一致し、成功をおさめている一方で困った問題も明らかになってきました。

その一つに事象の水平線問題と呼ばれるものがあります。宇宙の物質密度は極めて一様です。宇宙背景放射も同様に極めて一様です。これは光の速度で到達したわけですから、地球とこの事象までの距離より離れている2点間では、まだ情報は伝わっていません。つまり因果律で結ばれていません。もっとずっと過去の事象はすでに光が届く範囲に入って因果律で結ばれます。

ところが宇宙の晴れ上がりはビッグバンから40万年頃ですので、宇宙の現在の年齢137億年から見れば、ごく始めの一瞬です。因果律で結ばれているのは、ほんの少しの領域です。因果律的に関係の無い領域からの放射が全くと言ってよいほど同じというのは不自然です。

これを解決するためビッグバンの前にインフレーションと呼ばれる急激な膨張があり、因果律の水平線を越えて一気に広がったとする説があります。インフレーションが終わってビッグバンが始まる時、再び因果律で結ばれる範囲に入ってきたとする説です。

この説はこの問題だけでなく、宇宙が(宇宙を特徴づける大きさに比べて)極めて平坦である問題をも解決する可能性があること、因果律の範囲を越えてインフレーションを起こす直前の量子揺らぎがビッグバンの宇宙サイズにまで拡大されても残り、それが現在観測されている小さな揺らぎを説明できる可能性があることなどいくつかの問題解決の可能性を秘めているために精力的に研究がされています。

技術と社会

宇宙マイクロ波背景放射が、なぜ宇宙論からの要請で測られずに1965年まで待たなければならなかったのかという点について、ワインバーグの解説書で、一章を割いて議論しています。

彼の論点は、理論的にも観測技術的にも1940年代遅くとも1950年代半ばには発見できたはずで、1965年になって、それも宇宙マイクロ波背景放射を測る目的ではなく別の目的で測ってようやく発見された、つまりこの時に至っても宇宙論的視点から測られたわけではなかったのはなぜだろうというわけです。

彼はこの解説書の中で三つの理由を挙げています。第一の理由は、ガモフ等の宇宙論は当時すべての元素がどのようにできるかを論じていて、ヘリウムの比率に特に着目しているわけではなかったこと、第二の理由は、これは理論屋と実験屋のコミュニケーション不足の古典的典型案例であること、そして第三に(これが最も重要だとも述べていますが)当時、宇宙の初期に関する理論を真剣に受け止めるのはとても困難だったということです。

ここではこの問題に対する私なりの考えを述べてみたいと思います。

宇宙マイクロ波背景放射を測定したアンテナはエコー衛星を使った通信実験用のものです(この点は論文中に書かれています)。筆者の疑問は、何の目的で宇宙からのマイクロ波を測っていたかです。通信中に入り込むあらゆる雑音源を特定しようとしたというのが最も説得力がありそうですが確証は見つけられませんでした。

これより少し前、通信衛星は飛躍的な進歩をとげます。エコー衛星はその名の通り、地上から送信された電波を単に反射するだけの衛星でエコー1号(1号は失敗して正しくは1A号)は1960年に打ち上げられました。1962年には受信電波を増幅して再送する能動型通信衛星テルスター衛星が打ち上げられました。

一方で、エコー2号が1964年に打ち上げられました。

1964年には能動型通信衛星シンコム3号が静止軌道に打ち上げられ東京オリンピックのテレビ画像が送信されました。

つまり、宇宙マイクロ波背景放射を測った時には、衛星による通信技術は飛躍的発展をしている最中でした。

そのような状況なので、多分、受信波長である4GHz

帯のありとあらゆる方向から来る電波を測る社会的需要は多分にあったものと思われます。

そのような社会的需要があったからこそ高価な大型アンテナの長期使用やその回路系を液体ヘリウムで冷やしてまで熱雑音を低減するような方法（これも安くはありません）が可能であったのではないかと筆者は推測しています。

一方、大型加速器は高周波、高電圧、電磁石、真空、また最近では超伝導など様々な要素技術が結集されたものです。つまり各要素技術は、もともとそれぞれ単独で応用分野を持っていました。もしそのような分野を持っていなければ今のように急速に大型化、大強度化ができたとは到底思えません。

このように技術に対する社会的要請の高まりの時期や形態の違いがこの問題の答えではないだろうかと思っています。

おわりに

大型科学研究は経費や人手や時間がかかります。

いつ役に立つかわからないような基礎研究の成果だけで、多額の税金を使う理由にするには限界があると筆者は考えています。上で述べたように大型の科学研究装置や設備や一般に様々な高度技術の複合体です。その装置や設備を建設し維持するには各要素技術を持って維持するだけでなくそれらを組み合わせて一つのシステムとして運転し運用する技術を持つことです。各要素技術がそれぞれが持つ応用分野にどのように展開されるのかを示すことが重要であると考えています。

大型科学研究はもはや一つの国では建設・維持できない状況になりつつあります。つまり国際協力無しに実現できない事態になりつつあります。この時、学術的研究成果（発見）は公開され共有されることで合意できるようにしても、その装置や設備を作るにあたって開発された技術（発明）は、どう扱うべきかという問題を生じます。またその装置の置かれた国はそれだけで様々な利点があるわけで、それをどう評価して費用分担を決めるのかという問題も生じます。各国の研究者はそれぞれ国の出資者（納税者）に対して説明責任を負っているわけですので、簡単には決まりません。

社会現象の中には、物理学で見られる法則の類似を感じることも多々あります。

大型科学研究を遂行するためには、科学力、技術力の結集だけでなく、組織を作りあげたり、資金計画を立てたり、運用規則を定めたりする力も必要です。様々な力を一つの大きな研究目標のために結集して熱い議論をして、分担を決め一つのシステムとして動かしていく、この方法は、まるで研究分野での新しい宇宙を創り出すビッグバンモデルのように思えなくもありません。

profile

藤井 啓文 (ふじい ひろふみ)

職歴

- 1974年 東京大学原子核研究所助手
- 1977年 同 理学部助手
- 1987年 高エネルギー物理学研究所
(現：大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所) 助教授
- 1996年 同 教授
- 1999年 総合研究大学院大学数物科学研究科教授 (併任)
- 2004年 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構知的財産室長 (現：社会連携部知的財産室長) (併任)
- 2007年 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構産学公連携室長 (現：社会連携部産学公連携室長) (併任)

学位

理学博士 (1976年広島大学)

