

# 単位の定義

## と

# 単位の計測の定義

### 要旨

物理学を発展させる上で、単位の定義を一貫することは大切である。特に、2つ以上の異なる物理学体系を組み合わせる場合に単位の扱いが一貫していなければ、計算結果が不正確になるのは当然である。そればかりか、特定の単位に基づく値が発散したりゼロになることで、方程式に見かけ上の特異点が現れたり、方程式全体にわたって値が不定になったり、全くナンセンスな解を得てしまうことにもなりかねない。「質量の定義」として「重さ」を使ってしまうと、宇宙空間で見かけ上「質量がゼロ」の状態になり、質量  $m$  を乗算する項は値がゼロになり、質量  $m$  が分母にある項は値が発散してしまう。質量と重量の取り扱いミスはつまらない笑い話だが、現代物理学が同様の間違いを犯していないという確証はない。本論では、単位の定義を「単位そのものの定義」「単位の計測の定義」として分けて考え、それぞれの定義がもつべき最適な要素を提案する。さらに、時間の定義を中性子の身になって考え直すことで汎用性の高い定義を目指す。

## 1. 緒言

単位の定義は大事である。2つの異なる系統の理論を統合する時、一方の定義をそのまま持ち込めば理論が崩壊する場合もある。例えば、「質量の定義」はかつて「重さの定義」と同一であった。抽象性と厳密性に欠ける「重さの定義」は、一定の重力が存在する地球上における物理学でのみ有効である。もしも重さの定義を質量の定義として用い、宇宙空間における物理計算を行えば、物体  $m$  の質量は無重力でゼロになる。意味も考えずそのまま計算すれば、物体  $m$  の加速効率は無限大 ( $a=F/m$  でどんな力でも好きなだけ加速できる)。つまり、重さの定義を質量の定義として誤用すれば、質量が数式上  $0$  となり、加速を計算すると解なしの特異点が現れたように見える。

量子力学と相対性理論は単位の整合性がないと考えられる。単体では正しいこの二つの理論が両立できないのは、使っている変数や定義のどれかが正しくない可能性があるのだ。そのためにも、単位の適切な細分化と統合、さらなる抽象化、厳密化が必要である。

## 2. 目的

SI 単位系の単位の定義の妥当性、単位の定義の厳密性を再検討し、よりよい定義があれば比較検討する。

## 3. 方法

単位の定義として、「単位そのものの定義」と「単位の計測の定義」をまず分けて考える。現状ではこの二つの定義はごちゃ混ぜにされており、単純に「単位の定義」として SI 単位系が定義され、時々更新されている。しかし、理論物理学で単位を扱う場合、実用レベルの単位の定義と、理論上の単位の意味の定義が完全に一致するとは限らない。例えば、料理をするときには質量の定義としてグラムを使う。実用レベルでは、砂糖の量をバネ量りで量ろうが、天秤で量ろうが問題ない。つまり、重量と質量を混同していてもよい(重量と質量どちらでグラムを定義してもよい)。しかし、それとは別に、理論上の質量はヒッグス粒子との相互作用感度で定義すべきである。つまり、「単位の計測の定義」は必要な精度を満たす計測の方法を基準として提示しているだけであり、場面ごとに変化してもよいものである。一方、厳密な物理計算や新理論構築において、質量の「単位そのものの定義」を忘れてはならないのは当然である。そして、「単位そのものの定義」は、単位の物理的な意味に立脚すべきである。質量は(ヒッグス相互作用する)物質の量を定義するものであり、重力を利用した定義や、物質の種類と体積を限定した定義は、「質量の単位そのものの定義」として明らかに不十分である。その上、単位の定義としての妥当性もない。「単位そのものの定義」かどうかという観点からいけば、時間の定義にも問題がある。現在までの時間の定義は、「日周」「地球の自転時間」「地球の公転周期」「セシウム 133 の放射周期」のいずれも精度を上げていった「単位の計測の定義」である。いずれも「時間そのものの物理的意味」には触れておらず、その妥当性については不明である。つまり、「時間の単位そのものの定義」は不明である。

まずは議論のため、SI 単位系の「単位そのものの定義」と「単位の計測の定義」を一通り作成し、必要であれば細分化し、あるいは抽象化した定義を定める。その上で、それらの定義の意義や妥当性を検証する。

## 4. 結果

	時間	長さ	質量	電流	熱力学温度	物質質量	光度
	秒	メートル	キログラム	アンペア	ケルビン	モル	カンデラ
	s	m	kg	A	K	mol	cd
単位の計測の定義	セシウム133原子基底状態の2つの超微細構造準位間の遷移周期の91億9263万1770倍	1秒の光速距離/2億9979万2458	白金イリジウムのkg原器	真空中に1m間隔で平行に置かれた1本の直線状の導体を流れ、導体1mにつき $2 \times 10^{-8}$ Nの力を及ぼしあう一定の電流	水の三重点の熱力学温度の273.16分の1	0.012キログラムの炭素12の中に存在する原子の個数	540テラヘルツの単色放射で所定方向の放射強度が683分の1ワット毎ステラジアンである光源
単位の定義	相互作用の尺度 OR 相互作用したボソン数	相互作用に必要なコスト	ヒッグス粒子またはグラヴィトンに対する反応量	1クーロンの電気量を持った粒子を1秒間に通す電流の大きさ	粒子の運動エネルギー	粒子の数が $6.02 \times 10^{23}$ 個である	光子の数

### 1) 時間

時間は物事の変化に付随する理論的パラメーターであり、何らかの実体がある概念ではない。だからこそ、時間については「時間そのものの定義」を慎重かつ厳密に行わなければならない。時間という単位がどのような性質をもつのか未定義な状態では、一般相対性理論と量子力学で使っている時間という単位が同一かどうかすら疑わしいのだ。本来は、「時間そのものの定義」の意味を考えながら、状況に応じて「時間の計測の定義」を選ぶべきである。現行の定義は時間の遅れに関しても何も語らない。加速中の物体内で光の進路が延びることが、時間が遅れることの説明としていることもあるが、これは時間の遅れに関する「事実の提示」であって「理由の説明」ではない。さらに現行の時間の計測の定義は、強い重力下や核子内での計測に不向きであるし、単体の中性子の寿命との整合性も十分とはいえない。また、ブラックホールに落ちた物体は時間が止まるといった説明も見かけるが、厳密には「極めて長い(無限よりは小さい)時間をかければブラックホールの任意の位置まで落ちる」はずである。時間が0または無限になることを許している現在の定義が、時間  $t$  を方程式の特定の項の分母に含む方程式に悪影響を与えていることは明らかである。

#### (1). 時間そのものの定義

本論では、時間そのものの定義として「相互作用したボソン数」というものを採用する。より厳密には、「ボソンが作用するために要する最小タイミング長において、作用可能なボソンのうち作用できたボソン数の占める割合」が時間そのものの定義である。例えば、1 単位チャンス(ボソンが作用できる最小タイミング長。プランク時間のようなもの)というものを考える。1 単位チャンスに有限個しかボソンが作用できないというのは妥当な仮定である。なぜなら、ボソンが同一座標に無限個存在できても、物質に対して無限個作用できるとは考えられないからである。無限個の作用を許すなら、物質に対して無限に相互作用を強めることができるということになり、不自然極まりないばかりかブラックホールの存在すら否定してしまう。特定の物質に対して作用できるボソン数に上限値があり、競合した場合は互いに阻害要因となるという仮定は、妥当性のある仮定と考えられるが検証にはそれなりの施設が必要である。本論では検証は先送りとし、必要な仮定としてその仮定の上にて考察する。

1 単位チャンスにおいて、10 個のボソンが作用可能な物体に対して、フォトンが 60 個、グラヴィトンが 40 個、合計 100 個のボソンが作用待ちしているとする。この場合、確率的に **フォトン:グラヴィトン = 6:4** となる可能

性が高い。この場合、1 単位チャンスにおいて光子時間は  $\frac{6}{10}$ 、グラヴィトン時間は  $\frac{4}{10}$  進むことになる。光子時間は 40%の遅延状態となる。言い方を変えれば、この状態の物質が化学反応を起こすためには、グラヴィトンによる障害がほとんどない地球上に比べて約 1.7 倍時間がかかることになる。無論、10 個が作用可能なタイミングで 100 個の待ちが生じているというのはボソン濃度過剰であり、ブラックホールほどではないにしてもかなりの過密スケジュールである。イメージしやすくするためもっと極端な例を出せば、ブラックホールではグラヴィトン数が極端に多いため次のようになる。1 単位チャンスにおいて、光子数 60、グラヴィトン数  $6 \times 10^{41}$  程度とすると、

光子:グラヴィトン =  $1:10^{40}$  となり、地球上に比べて  $10^{40}$  倍まで光子時間が遅延する。このように、重力による時間の遅れは、電磁相互作用のグラヴィトンによる障害に起因する、光子作用効率の悪化という形で表現できる。

現行の物理学における「時間の計測の定義」は、そもそも電磁相互作用に偏りすぎである。地球上のマクロな物理現象のような環境下では、電磁相互作用のみで時間を定義しても悪くはない。ただし、我々人類が直接的に高い精度で計測できる相互作用は電磁相互作用だけであるために、時間の定義に電磁相互作用だけを恣意的に選んでしまっているのは見過ごせない。核子中の中性子の寿命と単体の中性子の寿命が異なることは、寿命の変化ではないという解釈もできる。現行の解釈では、核子中の中性子の寿命は極めて長く、単体になると約 880 秒前後まで寿命が短くなる。これを、見方を変えて、中性子の寿命を基準として時間を定義することもできる。言い方を変えれば、核子中では(電磁相互作用の)時計が極めて遅れており、核子の外では時計の進みが速くなるともいえる。中性子の身になってみればわかるが、中性子たちからすれば核子の中はブラックホールのように時間が遅れているのである(外界に対して相対的に寿命が延びている)。つまり、電磁相互作用で定義した時間のほうがずれているといえる。電磁相互作用と中性子の寿命(弱い相互作用)どちらで時間を定義してもいいはずなのに、中性子のほうが時間の基準としては不当に軽んじられているのだ。単体の中性子の寿命に 9 秒以上の異常な誤差があることに関していえば、理論的には弱い相互作用の時間と電磁相互作用の時間のずれ方のずれである。端的に言えば、核子中では弱い相互作用が障害されて滅多に崩壊せず(弱い相互作用時間の遅延)、核子外では弱い相互作用の障害があまりなくなる。障害がより少ない状況下では弱い相互作用が促進して寿命が 879 秒、少し障害されていけば寿命が 888 秒となる。

このように、各相互作用がどれだけ可能であったかを指標にすれば、時間の記述はより厳密になる。この定義は、現行の時間の定義と矛盾しない。現行の定義は「電磁相互作用の作用具合」がそのまま時間の定義になっているわけで、本論での定義は少し見方を変えて時間の定義を拡張しただけである。

また、この定義においては、ボソンごとに別々の時間を定義でき、そのことでいくつかメリットがある。まず、時間の遅れという現象を、基本相互作用の作用確率の減少という形で、よりはっきりと表現できる。例えば、重力による時間の遅れは次のように書き表せる。「地球上での時間の流れ」→「ブラックホール付近での時間の流れ」がどのようになるかという、地球上での電磁相互作用時間:地球上での重力時間=9:1→8:2 である。ふたつめのメリットは、負の時間というものの意味を定義できるということである。相互作用の個数によって時間を定義するならば、必然的に負数の時間、時間の逆行は起こりえない。負数の時間は、あくまで計算上の数値であり、時間  $t$  が現象として 0 以下になることはありえないことになる。このような縛りは、時間という変数の範囲を限定し、方程式を解く際の有

用な限定となる。

まとめると、我々が日常的に使っている「時間」とは、実は電磁相互作用のみに極端に依存した「電磁相互作用時間」であり、電磁相互作用が遅くなるということは、化学反応も含めた全ての生物的な営みや運動そのものも遅れるということである。重力相互作用の濃度が増えれば、相対的に電磁相互作用が阻害されて減少する。つまり、強重力下では重力時間が充進しながら電磁相互作用時間が遅延するのである。このように考えれば、ブラックホール内での時間の扱いは少々変化する。つまり、時間(電磁相互作用時間)は完全には静止せず、極めて微小ながら進行できる。周りが極めて高濃度の重力子に満ちていても、たまには光子が作用できるはずであるから、時間の流れは厳密なゼロにはならない。

さらにいえば、ボソン同士の相互阻害は、強い相互作用や弱い相互作用が現れるマイクロ空間で急激に複雑化する。厳密に時間を扱うためには、現在使われている時間の定義が電磁相互作用のみに恣意的に依存していることを自覚し、マイクロ状態で電磁相互作用がどのように阻害されているのか実験で確かめる必要がある。精密な計測ができれば、核種ごとの崩壊定数を、陽子数と中性子数から理論的に計算することも可能になるかもしれない。前述したとおり、中性子の寿命は明らかに核子中で延びており、つまり「弱い相互作用時間」の減少が起きていることは明白である。

## (2) . 時間の計測の定義

時間の計測については、その数値を何の目的に使うかが重要である。各種ボソン時間を計測するには、計測に使用する物理現象の純粋性と直接性が重要である。純粋性とは、相互作用の単一性とも言い換えることができる。例えば、重力時間を計るには砂時計が便利であろうが、砂と砂の摩擦や空気抵抗は電磁相互作用によるので、砂時計は厳密には電磁相互作用と重力相互作用(さらにはヒッグス相互作用も)の影響を受ける。これは純粋ではない。完全に純粋な計測は難しくても、何らかの方法で不要な相互作用の影響を相殺する必要があるだろう。直接性とは、現象が計測値として反映されるためになるべく直接的に作用すべきということである。例えば、ねじ巻き式時計は、ばねも歯車同士の駆動も電磁相互作用によるため純粋性は高い。しかし、ばねも歯車も作られたものであり、表面の傷や金属の格子欠陥、構造的なばらつきが誤差を生む。金属の弾性という性質を利用しているが、その駆動に多くの機構が関わり、直接的に値を与えない。これは直接的ではない。電磁相互作用時間の計測については、今のままセシウム時計で問題ない。セシウム時計は純粋性も直接性も高いといえる。

重力時間の計測は、真空中での落下、振り子のような半重力運動などが考えられる。ただし、これらは少なくとも地球上ではほとんど役に立たない。重力は弱すぎて、しかも地球上では基本相互作用の濃度が極めて高い空間は実現できていないからである。つまり、重力が目に見えて阻害される、あるいは重力が目に見えて強い空間がない限りは意味のある値は得られない。当然ながら核子中は強い相互作用の濃度が極めて高いが、マイクロ空間での重力測定は気が遠くなる話である。

弱い相互作用時間の計測は、中性子の寿命が最適である。計測法によって誤差があるのは僥倖である。中性子の寿命が長い方の計測法は、何らかの形で弱い相互作用を阻害していると考えられるので、精密に検討すれば比較的精度の高い時計が作れる見込みがある。

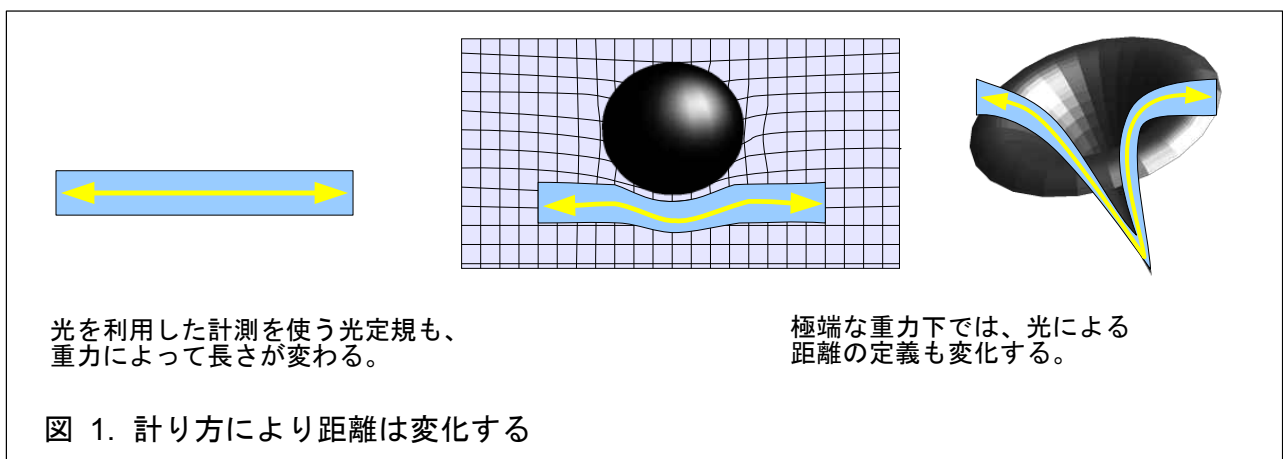
強い相互作用時間の計測は、1つの重大な困難がある。強い相互作用は近距離過ぎて強すぎるため、直接的な観測は困難である。また、強い相互作用の変化は核子の変化を意味することもあり、膨大なエネルギーをつぎ込むか、あるいは膨大なエネルギーを制御しなければならない。

## 2) 長さ

長さについては、ひとつはっきりさせておかなければならないことがある。「長さそのものの定義」をする上では、「大きさ」と「距離」は区別されるべきである。この項では長さという単位が計測に使われる「大きさそのものの定義」と「距離そのものの定義」を同時に論ずる。長さという単位は、通常は物体の「大きさ」と空間における「距離」をどちらも表現できる。これは、日常生活においては極めて当たり前であり、妥当な定義である。しかし、大きさと距離が常に対応するかというと、そういうわけにはいかない局面もある。

大きさは、対象物質と存在する空間の状態を前提条件としてで定義すべきである。どんな場合でも有効な大きさの定義などありえない。例えば、鉄製のものさしと中性子のみで構成されたものさしの2種類のものさしを考える。鉄製のものさしは強い相互作用で結合した原子核と、電磁相互作用で結合した金属結合という主に2種類の力で結合している(重力は弱いため無視)。一方、中性子は強い力と重力で結合している。地球上でどちらも1mの長さで製作したこの2つのものさしをブラックホールのような強重力下に置けば、次のようなことが起こる(なお、ここでは潮汐力が弱い、つまりブラックホール自体が大きくて重力濃度の勾配が少ないものとして考える)。鉄製のものさしは、強い重力で時間が遅れ、電磁相互作用の伝達も遅くなることで金属結合自体が緩むだろう。核子も若干大きくなるかもしれない。総じて、ブラックホール近傍で1mのものさしは全体的に緩んで例えば1.2mになったとする。一方、中性子は強い相互作用と重力で結合する。重力でものさし内部の重力が弱まったりはしないので、弱まるのは強い相互作用だけ。結果として緩みはするが鉄製のものさしと異なり1.1mまでしか緩まない。こうなると、どちらのものさしを信じるべきであろうか。我々は日常生活で電磁相互作用以外をほとんどコントロールできない。我々の体もほとんどが電磁相互作用で構築され、動きもエネルギーも電磁相互作用由来である。化学はすべて電磁相互作用のみの理論である。だから鉄製のものさしを推してしまいそうであるが、その妥当性は十分に議論すべきである。少なくとも、中性子塊が市民権を与えられたならば、中性子ものさしの方が正しいというであろう。このように、「大きさ」は極端な環境下では曖昧であり、また結合に関連する基本相互作用によって振る舞いが異なる。したがって、「大きさ」は、どのような環境下の、何の大きさなのかを常に問うべきであろう。

距離は「相互作用の種類」と「空間の状態」を前提条件として固定した上で定義すべきである。空間の状態が違えば、距離を指す物差しそのものが歪む(図1)。例えば、電磁相互作用距離は「他の相互作用がない状態で光が1



秒間を要する移動コストの3億分の1」とする。つまり「距離そのものの定義」は、「ボソンが伝達されるコスト」として定義される。一見すると奇妙だが、この定義は便利である。何しろ、既存の定義をそのまま使え、なおかつ極端な空間での距離の解釈を単純化できる。距離とは何か、といえ、結局のところ「どれくらい離れているか」の指標であり、

つまりは「何かをする、伝える」ためにどれくらい大変か、の指標である。物理的に何かをするためには、通常2種類の支払い方がある。一つは時間をかけることである。もうひとつはスピード(エネルギー)を上げることである。物理的に移動するのであれば、光速を上限としてエネルギーを増やすことで移動でき、必要な時間を増やせばエネルギーが少なくても移動は完了する。 $x=vt$ であり、 $v$ も $t$ もゼロより大きければよい。これはつまるところ移動コストである。離れていればいるほど、移動時間または必要なエネルギーが増える。これがコストである。どれほどのコストを支払えば移動しきれるか、これが距離そのものの定義である。この定義は、電磁相互作用に限っていえば、ニュートン力学や一般相対性理論で使われている $1m$ の定義と何の違もない。変えるのは距離というものに対するより根本的な認識の仕方である。

## (1). 長さそのものの定義

前述のとおり、長さによって計測すべき物理量「大きさ」と「距離」は(根本的な意味では)別物である。

### ①. 大きさそのものの定義

物体の大きさは、物質の結合状態によって変化するため、極端な環境下では距離との対応関係がなくなる場合もある。したがって、「大きさそのものの定義」は物質の存在する空間のボソン量を指定した上で、素粒子を直線的に並べた個数、または粒子が規則的に配置された物質の一直線の個数で定義すべきであろう。例えば、「電磁相互作用物質の真空中での大きさ」は、金属結合した白金原子100億個分(概数)と定義できる。同様に、「強い相互作用物質のブラックホール内での大きさ」は、中性子のものさしを定義することで理論的に定義できる。

### ②. 距離そのものの定義

空間における距離は、相互作用するために必要なコストとして考える。したがって、「距離そのものの定義」はある距離 $x$ だけ離れた2点同士で、特定のボソンが作用するために必要なコストとして定義する。「電磁相互作用距離」は、2点間で電磁相互作用が働くために必要なコストとして定義できる。すなわち、電磁相互作用が作用するためにプランク時間しかかからない距離を最小単位とし、その距離の個数として表せる。通常空間(ボソン濃度が薄い空間)では、2つの磁石の間の「電磁相互作用距離」と「重力相互作用距離」は同じである。ブラックホール近傍では、電磁相互作用距離は伸びる(または、電磁相互作用に関して時間が遅れると解釈してもよい。距離と時間はどちらかを固定しないと片方を定義できない)一方、重力相互作用距離はそのままである。つまり、ボソンの濃度によっては、2つの物体間に複数の距離が定義できる。ブラックホール内では、電磁相互作用距離は無限ではないにしても極めて大きくなる。

これはつまり、相互作用にかかる時間がそのまま距離に対応するということでもある。強い相互作用距離は、上限値がありそれ以上はなれると無限に離れたと見なせる。一方、量子効果で一瞬で相互作用が伝わると見なせるなら、例えどんなに離れて見えていようと、距離は最小値であると見なせる。

## (2). 長さの計測の定義

### ①. 大きさの計測の定義

通常物質は電磁相互作用が優越して結合しており、電磁相互作用に比べれば重力も弱い相互作用も弱い。強い相互作用は強すぎるがマイクロサイズで一定なので、通常空間での計測の際は金属製の定規は十分な精度を持っているといえる。一方、ボソン濃度が変化している状態では、大きさを精密に計測することは困

難で、計算で他の相互作用との兼ね合いを相殺する必要がある。中性子物質の大きさに関しては、そもそも計測の機会があるか疑問である。

## ②. 距離の計測の定義

2点間の距離は、通常空間では大きさと対応させて計ってもよいし、レーザー等を使っても計測できる。電磁相互作用以外の距離を、ブラックホール近傍や核子中での距離を考える場合に理論上取り扱うのは有意義だが、計測方法の定義は実用性とはほど遠い。よほどのことがない限り、2点間の距離というものが、計測に使用する相互作用ごとに変化することなどない。そもそも、重力のような、発生源を制御すること自体が難しい上に微弱すぎて変化を計測できない相互作用の距離を計測しようというのはかなり難しく、ほとんどの場合は割に合わない計測である。

## 3) 質量

質量は、通常物質の空間中での動かしにくさ、動かすために必要なコストの目安である。理論的にはヒッグス粒子に対する感度、作用量という見方もでき、これがより根本的で厳密な定義かもしれない。

### (1). 質量そのものの定義

質量とは、物質のもつ「量的性質」のうち、動かしにくさに着目した量である。これはつまるところヒッグス粒子に対する感度に他ならない(イメージ的には摩擦に似ている)。厳密に定義するなら、「静止状態から一定の加速をするときに相互作用するヒッグス粒子の総量」を使うのが妥当である。質量の理論的な計測のために使われるキップルバランス法は、重力を仲立ちとしてプランク定数として質量を測定する。しかし、厳密にはこれは質量の計測の

定義である。無論、これは  $m(e) = \frac{2R_e h}{c\alpha^2}$  という恒等式で定義されるため、計測の定義でありながらほぼ「単位そのものの定義」である点が優れている。アボガドロ定数法によってプランク定数を決定する場合も、同程度の「質量の計測の定義」である。現時点では、「質量の計測の定義」と「質量そのものの定義」はかなり高い関連性を持ち、十分な定義であると考えられる。

一方で、将来的に質量の単位そのものの定義を見直す必要性が出てくる可能性はある。キップルバランス法において、重量と質量が特定の場における重力定数  $G$  によって換算可能なのは、通常物質を対象にしている場合に限られる。特殊な例であるが、例えば重力に対する感度はあるが、ヒッグス相互作用も電磁相互作用もしないような素粒子がある場合、強力な重力場以外では光速に近い速度で移動していると考えられる。このような物質は重力によってしか捉えられないが、重力自体が弱いくせに遠隔力であることが災いし、観測はおろかノイズとの区別も困難である。このような、通常物質において前提とされる慣性質量と重力質量の等価性が成り立たない物質は当然想定すべきで、逆にヒッグス相互作用はするが重力感度はない物質なども考えられる。それらを議論する際には見直しも必要である。

### (2). 質量の計測の定義

質量の計測の定義は、物体の動かしにくさを、運動エネルギーを与えることでも計測できる。しかし、重力や摩擦などを効果的に相殺する工夫をするよりも、精密な分銅と天秤を使って質量を計測するのが現実的である。マイクロサイズでは、質量を計測するよりもむしろ粒子の個数と比重から算出する方が精密かつ純粋である。

## 4) 電流



電流に関しては、電磁相互作用に直接立脚した単位である上、極めて純粋な物理現象である。異論を差し挟む余地はなく、現状の単位でよいと考えられる。

### (1). 電流そのものの定義

1クーロンの電気量を持った粒子を1秒間に通す電流の大きさとして定義できる。より完全な定義は2019年に採用された電気素量の  $6.24150962915265 \times 10^{18}$  である。電子一個分の電荷が単位としての最小量であり、最少量の個数として単位が定義できることに一部の疑義もない。

### (2). 電流の計測の定義

電流を計量する上では、現状のまま電流による電磁力で計測することが計測の純粋性、直接性ともに高く好ましいと考えられる。

## 5) 熱力学温度

熱力学温度は、粒子の持つランダムな運動エネルギーの指標であり、実際にそのように定義されている。

### (1). 熱力学温度そのものの定義

熱力学温度は、粒子群のもつランダムな運動エネルギーの統計的な性質を表すものであり、必然的に確率的、統計的性質を内包している。しかしながらその意味するところは極めて明白であり、議論の余地はほとんどないと考えられる。

### (2). 熱力学温度の計測の定義

現在使われている、水の三重点の熱力学温度の273.16分の1を1度とする、というものは、計測の上でも便利である。一点厄介なのは、どんな温度であっても計測により値がずれる点である。

## 6) 物質質量

物質質量は、まさに物質の個数であり、これ以上ないほど単位の定義と単位の計測の定義が合致している。

## 7) 光度

光度は、どうしても人間にとっての実用性という根本的な主観から逃れられない単位である。光子の数を単純に定義に使いたいが、人間の感覚に対応する単位である以上、視細胞が受け取る波長と受け取れるエネルギーの平均値を使わざるを得ない。厳密に定義することが本質的に難しく、本論ではSI単位系以上に便利な定義を提案できない。ここでは、明るさについて別の側面を述べるに留める。

### (1). 別の明るさ

明るさというものを単位化するに当たって、純粋に物理的に定義するならば、「光子の数」または「光子が受け渡したエネルギーの総量」を使うことになると考えられる。さて、光子に比べて極めて相互作用が弱く、また人間が感覚器を持たないために、重力の総量たる「重力の明るさ」は単位として実用化されていない。しかし、重力相互作用のボソンである重力子の存在がほぼ確定した今、恒星等のパラメータとして「光子の明るさ」「重力子の明るさ」などを定義して観測対象とするのは意外と面白いと考えられる。

## 5. まとめ

ここまで論じてきたとおり、少なくとも「時間」と「長さ」については、単位としての改善の余地があると考えられる。「時間」は、ボソンによって「単位そのものの意味」を定義することで、時間という概念をどのように扱うべきか指針を与えら

れる。現代における時間の定義は電磁相互作用によりかかっており、中性子等の他の相互作用を多く受けている粒子の立場を十分に考慮しているとはいえない。「時間」という概念は、その文脈によって問うべき本質が変化している場合があり、特に特定の相互作用が極端に大きな場合には「何によって時間を計測すべきか」よく考える必要がある。また、ボソンの作用に基づいた時間の定義は、重力による時間の遅れ、中性子の時間の促進(寿命の短縮)などを簡潔に説明できる。

「長さ」については、そもそも「距離」と「大きさ」を普遍的に扱えない可能性がある。より厳密に単位を使うためには、距離を「相互作用に必要なコスト」として再定義し、大きさは実在する物質の個数によって再定義する必要があると考えられる。

## 6. 考察

一般相対性理論において時間と空間を同時に考える必要があるのは、厳密には時間と空間が別ちがたいからではない。時空という概念が適切に動作するのは、光で定義した時間と光で定義した空間に強い関連があるからである。つまり、時空というひとまとめの概念があるのではなく、「ボソン定義した時間と空間を使う場合はセットで考えることになる」のだ。存在するというよりはそのように定義していることになる。

時空が歪むことで時間が遅れるというのは宇宙を観測した時の一側面である。光の光速を基準にする場合であっても、空間の距離を固定して時間を定義するか、時間を固定して距離を定義するかは任意である。光速度不変の基準は常に守らなければならないわけではない。