

村田次郎 むらた じろう

立教大学理学部

滑り台は大人の方が速い。この意外な性質について検証した前編'では、現代的なローラー式滑り台での結果を紹介した。今回はそれに引き続き、昔ながらの金属板式の滑り台ではどうなるのか、調べた結果などを紹介する。摩擦の法則で考えれば、重いものも軽いものも同じ速さで滑り落ちるはずだ。はたして金属板でも実際には重いものは速いのか。驚きの結果を見るとともに、そこにどんな思い込みが隠されているかをナナメから見よう。

摩擦力とは?

生活経験の中で摩擦は馴染み深いものではあるが、これについて一度落ち着いて考えてみよう。動いている物体があれば「速度の逆向きに摩擦力がはたらく。その強さは一定の値をもつ動摩擦係数に比例する。」というルールが教科書には確かに書いてある。しかしそうなる理由は書いていないので頭の中から「?」が消えない思いをした方も多いただろう。

摩擦について考える前に、まずは物理学での運動の捉え方を考え直すところからはじめてみよう。そもそも物理学で運動する球などの「物体の運動」を考える際には、興味をもって観察の対象とする物体を選定して、その動きを時間を追って考えるのが通常だ。これを表したものが運動方程式である。重力がはたらいて落下する状況でも同じで、落ちる物体の動きだけに着目する。作用・反作用の法則で考えれば、重力を及ぼす方の物体、つまり地球の動きも考える必要があるが、これは動きが小さいので無視する。地球が非常に重いからだ。

問題となるのは、相手が地球ほど重くない場合で、このときは相手の動きを無視することができない。例えばビリヤードの球の衝突を考える。図1の上段のように、衝突する相手の球が二つだけの場合には、自分を含めて三つの球それぞれの位

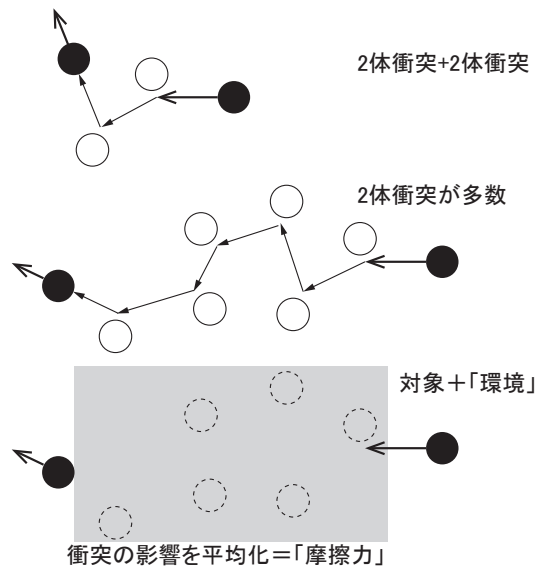


図1—ビリヤードの球の衝突
多数回衝突では、平均化して摩擦力として扱う。

置を時々刻々把握して、それらの動きを考えるだろう。運動方程式としては複雑にはなるが、解けないことはない。

しかし、球の数が多くなると厳密な計算は手に負えなくなってくる。多数の球がある場合にも、一つの球だけに着目して動きを追うだけでは情報が不足しており、すべての球の動きを厳密に追って計算する必要がある。コンピュータシミュレーションの得意分野ではあるが、紙と鉛筆だけで処理するには不向きだ。

球の数が極端に多くなった場合には、逆に数学

的な扱いが楽になることがしばしばある。着目する対象となる球一つ以外のすべてを、まとめて平均化してしまうのだ。そんないい加減なことをすれば、正確さは確かに失われる。しかし、球の数が極めて多い場合には、最終的に乱雑さは互いに均されて、連続的な媒質の中の球の運動、という見方が近似的に有用になってくる。

当然、実際には微小なジグザグ運動をしているのだが、平均的には「方向は前向きのまま、減速する」ように見えるだろう。そして平均的には左右へのぶれはおおよそ打ち消し合って小さくなるため、直進するものとみなしてしまう。

この際に、減速につながる要因を平均化したものが摩擦力だ。平均化という多少後ろめたい取り扱いの産物として、進行方向に対する後ろ向きの力、という単純な見方ができるようになる。摩擦力というと面の上を滑る物体の場合に限定された印象があるかもしれないので、一般には抵抗力とでも呼んだ方が正確に思えるかもしれないが、学術的にはそれに限定せず様々な抵抗力に対して用いられる。例えば、空気抵抗も摩擦の一種である。

面の上や、水・空気などの媒質中を物体が移動するとき、走った長さあたりに物体がどれだけの運動エネルギーを失うかが摩擦力の一つの定義である。「仕事」という概念があるが、これは摩擦の場合には摩擦力×移動距離で与えられるエネルギーであったことを考えればわかりやすいかもしれない。このことから、摩擦力の代わりにエネルギー損失(率)という用語が用いられることも多い。

ところでエネルギー保存則という最上格の法則が別にあるが、摩擦で物体のエネルギーが減っていくというのは、それと矛盾しているのではないか。物体が失ったエネルギーは、媒質の側が摩擦熱の形で受け取るので全体としては実はきちんとエネルギーは保存する。観察対象とする物体と、その他を平均化して環境とみなし、両者を分けて考えることで数学的な処理を容易にした。その代償としてエネルギーが一見、保存しなくなってしまうように見えるだけだ。

このように「粗視化」とも呼ばれる平均化の操作は「エネルギーが保存しないタイプの力が実在する」という類の思い違い、すなわちバイアスを生む危険性があることに十分な注意が必要だ。数学的処理の簡略化、という目的の下に有用な知恵として導入した粗視化が、勘違いの元凶となる場面は多々ある。その根本的な原因は、観察対象を主観的に選択して限定する、「いい加減な扱い」にある。

ローラー式再考

前編¹⁾で紹介した、滑り台を滑る速度は重い方が速いことをローラー式の滑り台で実際に示した研究は、多くの反響を呼んだ。大学生の卒業論文が1万近くの人に読まれたことは前代未聞の出来事だろう。日本語の論文が自由に閲覧できる媒体の登場は、アカデミックな関心を呼ぶ絶好のツールであると痛感させられた。

さて多くの方の目に触れたその卒業論文に対する反応は、概ね次のようなものだった。

- 反応 A：自分も今まで疑問だったが、思い込みではなかったと測定で確認できてよかった。
- 反応 B：大人は速く落ちていると勘違いして怖がっているだけで、実は速さは同じなのではないか。
- 反応 C：重いものが速く落ちるのは当たり前ではないか。
- 反応 D：ローラー式の結果は「摩擦ではない」別現象なので当たり前、金属板式では速さに違いが見られなかったのも教科書通りで当たり前だ。
- 反応 E：教科書と違って動摩擦係数が一定ではない方が自然なのか。ローラー式は、摩擦の正体が見えやすい一例なのだな。

筆者自身の狙いは「反応 E」であったのだが、捉えられ方は想像以上に様々でよい勉強になった。まず「反応 A：データ受容派」は、自分だけの思い違いではなかった、ずっと疑問だったがデータで示された、と素直に喜ぶもので反響の一定数

を占めた。

「反応 B：勘違い説」はおそらく記事の見出しだけを見たタイプの反応と思われる。大量の情報を即座に取捨選択する必要に迫られた現代人の習慣の結果として頻発する類のコミュニケーション上のミスであり、粗視化の一種とも言える。日常の場面では筆者も決して例外ではなく、自戒せねばならない。

「反応 C：当然、重い方が速い説」は重いものは速く落ちると説いた、アリストテレス派¹が現代も根強くおり、生活経験と直感のバイアスの根深さをうかがうことができる。むしろ前編での自由落下の一樣性の説明を丁寧に繰り返さない限り、ガリレオの発見は 400 年経った今も浸透しておらず、学識の高い方々を含めても多数がこのアリストテレス派に属することもわかった。

「反応 D：ローラー式は当たり前説」が少なくないことは想定外だった。これは物理学をよく勉強したと思われる層に多く見られた反応だ。ローラー式は教科書に書いてある面上の摩擦の状況ではないから法則から外れても気にしない。教科書で想定している状況である金属板式の測定結果は、習った通りなのでなにも矛盾がなくて安心、というものである。

前述の通り、摩擦とは粗視化の手続きで導入された概念だ。図 2 のようにローラー式の場合はエネルギーの移行の様子がよく見える。では金属板式の場合の摩擦はまったく別物かと言えば、その中身は例えば単にローラーが見えない程小さくなって、非常に多数になったものと思えばよい。ローラー式と違って回転以外にも複雑な運動を引き起こすためにきちんとした理論的な取り扱いが難しい。

しかし現象としては物体との接触を通じて、物体の運動エネルギーの一部がローラーなり金属の原子なりのエネルギーに移行し、結果として物体の方が減速する現象であることには違いはない。したがって金属板式だからと言って動摩擦係数が一定になる根拠があるわけではなく、ローラー式を参考にすれば、むしろ一定値ではない方が自然

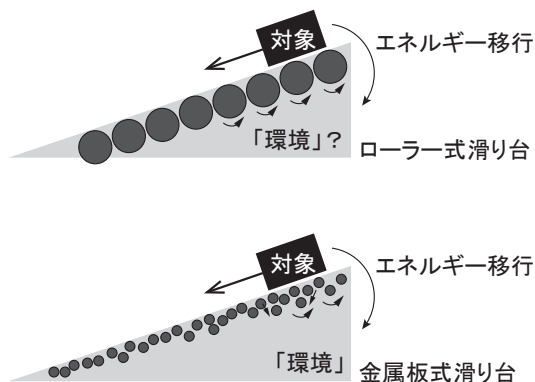


図 2—ローラー式と金属板式のいずれでも対象から環境へエネルギーが移行する

とも思えるだろう。

「反応 E：摩擦の中身に思っていたるきっかけ派」は、特に教育者に多く見られ、好意的なものであったように思われる。本研究の内容は学術的新規性ではなく教育的視点から興味深い、という筆者の考えで物理教育学会誌上に学生の卒業論文の内容を紹介したのだが、その狙い通りであった。ローラーは観察対象側に含めるのか、それとも環境とみなして平均化して摩擦の扱いをするのか、という視点の切り替えは、だまし絵に通じる面白さを感じさせてくれるだろう。

摩擦の例

面上の摩擦は、物理学では研究対象として正面から興味をもたれることが稀な一方で、工学的には重要な一研究分野を担っている²。実際、動摩擦係数は高校で習った通り一定であると思って済ませている物理学者がむしろ多数派だろう。摩擦と同様に複雑な現象でも、例えば気体の扱いなどは比較的単純であることから気体力学、熱力学という古くから精密な物理学の一大分野として非常な情熱をもって研究されてきた。

一方の摩擦は、マイクロで起きている現象が機械的なものから化学的なものまで多種多様で、連続的のみなせるほどの極限的な状況でもない、中途半端な数のマイクロの現象の重ね合わせという、やっかいな状況を取り扱う必要がある。したがって、

多体問題として理論的に正面から扱うのは至難の業であり、有用な粗視化を工夫する職人芸が活躍することになる。

理論的な難しさの一方で、生活、応用の場面では摩擦力にもとづいて考えることは非常に有用である。高校で学ぶ「動摩擦係数が一定」という摩擦の法則の扱いは、教育者が見出した苦肉の策とも言えるものだろう。実際、動摩擦係数が一定と考えてそれほど困ることはないのだ。しかしあくまで近似の産物であることを全員が忘れてしまってはならない。これを真理に格上げして信じ込んでしまうと、滑り台は不思議だ、というパラドックスにはまってしまう。

物理学ではあまり興味をもたれないこの不遇な摩擦だが、摩擦の一種として意識していないだけでその考え方は随所で見ることができる。例えばミクロの世界や宇宙を探る実験・観測では高いエネルギーの粒子、つまり放射線の観測が古くはマリー・キュリーの時代から必須の技術だ。また原子炉などからの放射線から身を守る、放射線防護の観点でも放射線がどのように固体などの媒質中で減速するかは必須の知識である。

これらはちょうど図1のビリヤードの球の状況そのものであって、ミクロには素粒子同士の衝突現象の重ね合わせであるけれど、非常に多い回数これが起こるためにエネルギーの変化量を平均化して取り扱うのが常套手段である。そのとき、まさに「摩擦力」が登場する(通常は「物質中でのエネルギー損失」という別の名前で呼ばれる)。

この一例が図3に示した、ベータ・ブロッホの公式³というものの性質だ。運動エネルギーの違いによって摩擦力は一定ではなく、大きく変動することがわかる。

概ねエネルギーが低いほど、つまり速度が小さいほど摩擦力は強い傾向がある。これは前編¹の図3で紹介した水上の石の場合とよく似た傾向である。特に、非常に低いエネルギー領域では図4のように停止直前に摩擦が最大に達することが知られており、ブラッグピークと呼ばれている。この性質は体表での不必要な被ばくを最小化して、

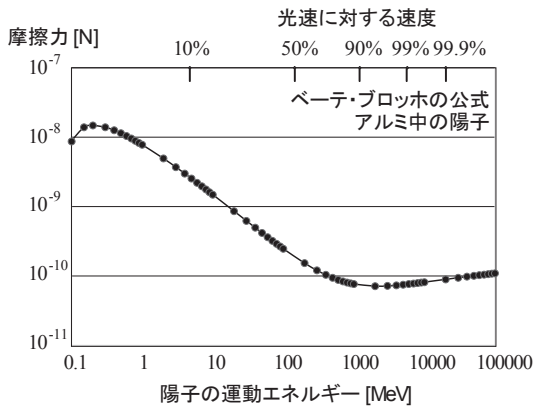


図3—物質中の放射線のエネルギー損失=摩擦力

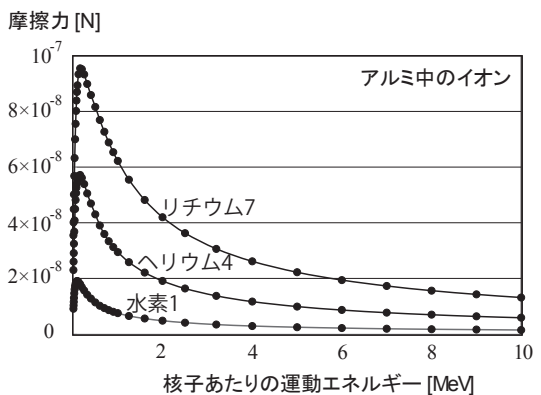


図4—低エネルギー領域における、物質中の放射線のエネルギー損失=摩擦力(文献4のデータより作成)

深部にある、がんの患部を集中的に攻撃する重粒子線治療に直接応用されている。図3, 4はともに縦軸を摩擦力として力の単位で表した図だが、ほかでこのような図は見たことがなく、今回初めて作られたものかもしれない。

これらはカーリングの石の摩擦によく似ており、狙った場所で石が停止するように選手が初速を調整する様子は、ブラッグピークが患部に位置するように粒子線のエネルギーを調整する放射線治療と酷似しており、興味深い。

摩擦に関連した他の面白い話題を紹介しよう。原子核を構成する陽子や中性子が三つのクォークからなることは知られているが、クォーク自体を一つ一つ、自由な状態として切り離すことはできない。しかしビッグバン直後の宇宙では、温度1兆度以上で発生するクォーク・グルーオン・ブ

ラズマ(QGP)という超高温の状態にあり、クォークは空間を自由に飛び回っていたと考えられている。これは2000年代に、筆者も参加していたアメリカのブルックヘブン国立研究所の加速器実験で人工的に生成が確認されたものだ。その有力な証拠の一つは、素粒子がQGP中を飛行する際、QGPでしかあり得ない強い摩擦力を受けたことを示したものだ⁵。

そして、滑り台

なかなか期待した「反応E」が得られなかったという思いを筆者はしばらく抱えていた。金属板式の結果が教科書にお墨付きを与える印象をもたらしてしまったかに見えたのが原因だろう。教科書通り、本当に重さによらないのか、それとも測定精度が悪くて違いが見えなかっただけか。

しばらく経ったある日、訪れた公園に、滑り台があった。初心にかえって、手元にあった空っぽのお弁当箱を滑らせてみた。次いで、それに石を詰めてみた。速い！ いやいやいや、絶対重い方が速いでしょう、これは！

やっぱりこれも証拠となるデータを取らなければ……。その後も時々思い出しては、色々なもので試してみるけれど、軽い方が速い場合も時々ある。どうも、表面に付着した砂や埃にかなり影響されている気がする。本物の滑り台では測定環境を揃えるのが難しいな、と思っていた。そこで本稿の執筆をきっかけに重い腰を上げてしっかり条件を整えて測ってみることにした。

実際の公園で人が滑る場合と同じように、綿100%の布をプラスチック容器の底に貼り付け、これをステンレス板の上で滑らせる装置を用意した。容器内に重りを入れて重さを調整した。観測しやすいようゆっくり滑らせるため、傾斜を緩くした滑り台を自宅に自作した。非常に邪魔だが科学のためには仕方ない。

さて、その結果は――。図5は重いもの、軽いものを二つ前後に並べて滑らせた様子である。重い方が先に滑っていき、その差を広げて速く落

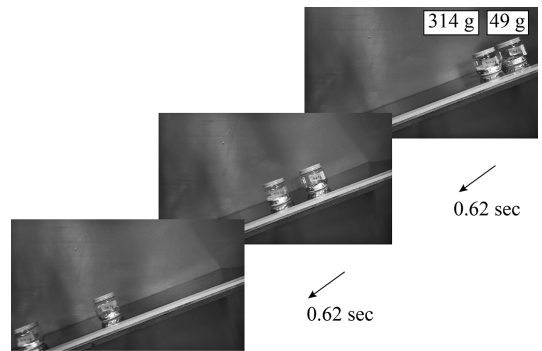


図5—二つのプラスチック容器を前後に並べて滑らせた様子
左の重いもの(314 g)は、右の軽いもの(49 g)より速く滑り降りた。

ちたことがよくわかる。ローラー式の場合は百発百中で重いものが圧倒的に速く滑ったのだが、金属板式ではそれほど差がつかず優劣が微妙な場合がある。前後ではなく横並びで試すと、同時に滑ったり優劣が逆転したりすることも稀にある。そうした場合には、よく見るとステンレス板の表面に指で触れた跡があったりする。これをよく拭いて表面を清潔に保ってやれば、やはり重いものが速い。前後に並べた場合には先に重いものが表面をふき取りながら滑り落ちる効果もあるだろうが、例外なく重い方が速く落ちた。100回試したが、例外はなかった。これだけ再現性があると、やはり面白い。

塩田君の卒業研究のデータ⁷で、金属板ではばらつきが大きかったのもこれで納得がいく。おそらく公園の実際の滑り台では表面の状態を整えるのは難しかったのだろう。今回は室内で測定環境をよく整えたのが奏功したと思われる。

この測定で初めて気づいたことがある。どうやら終端速度に達しているようなのだ。速さを比べるだけであれば目で見ただけでわかる。しかし、終端速度に達したかどうかは、ある程度精密な測定をする必要がある。

そこでローラー式のときと同じ方法で、画像処理型変位計を用いて位置を測定した結果が図6である。見たところ、ローラー式と同じ傾向で、見事に直線部分があり、終端速度に達していることが明白となった。そして依存性は強くはないも

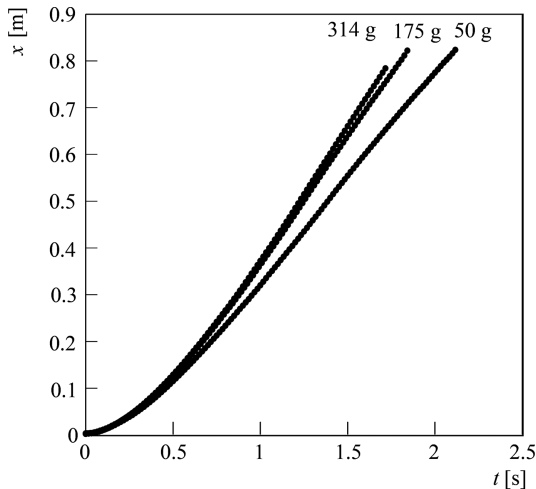


図6—前編'の図5と同様のステンレス板の場合の測定結果

の、重いものほど終端速度は大きい傾向が確認できた。

金属板式でも、やはりきちんと測れば動摩擦係数は一定ではなく、今回測った条件では速いほど摩擦が強く、重いほど摩擦が弱い。これが実際の公園の滑り台で人が滑った際にも感知できるかどうかは条件次第であり、表面状態によって再現性がある可能性はあるものの、ローラー式、金属板式を問わず、「重い方が速い」傾向自体はありそうである。

ここでは金属板式のみ試行したが、実際の公園には石材や樹脂を用いた滑り台も多い。服の素材との組み合わせなど、探究学習として調査してみたら新たな発見が期待できるかもしれない。

重い方が速い？

速いほど摩擦が強い、という傾向は前編'の氷上の石のそれとは逆であり、図3の物質中の放射線の振る舞いとも概ね逆である。エネルギー移行のプロセスが単純なローラー式とは違い、金属板式の摩擦の機構は複雑であり、摩擦力の速度依存性も、速度領域を変えれば傾向が逆転する可能性も大いにある。ベテ・ブロッホの公式などの、根拠がはっきりしていて精密な計算が可能で、かつ実験で確認できる理論を摩擦現象全般に対して

構築するのは難しいと思われる。

単純と思われるローラー式においてさえ、実際にはローラー自身を回転させるエネルギー以外に、軸受けでのエネルギー損失が無視できない。この性質は概ねストライバック曲線と呼ばれるものによって理解でき、油などの潤滑剤がある場合の摩擦に対してよく知られているものの、現実の滑り台ではベアリングが油切れをされていてさらに状況の理解を難しくしている。

摩擦現象は「エネルギーを徐々に失う過程」をなんでもかんでも含むと思うと、実に幅広い学問領域である。今回はローラー式と金属板式しかデータを取って調べてはいないが、実はプールにあるウォータースライダーでも試したことがある。これはかなりスピードが出るので恐ろしく、ついブレーキをかけたくなくなってしまうが、がんばって我慢して親子で何度も競争してみた。すると、子どもの方が速い……。数回しかやってはいないが、何度やっても同じであった。

これはおそらく身体とスライダーの間にある、水の厚みの違いのせいだと思われる。体重が大きいと、強い圧力でこれが圧迫されて水のない部分が増え、摩擦が強まるのではないかと。

あるいは、レストランの待ち時間に、メニューを滑り台にしてコインを競争させてみるとどうだろうか。摩擦は実に意外性に満ちた楽しい現象である。「どうして君は他人の報告を信じるばかりで自分の眼で観察したり見たりしなかったのですか。」というガリレオ・ガリレイの名言⁶を胸に、皆さんもぜひ、ご自身で色々試してみたいかがだろうか。

運動方程式？

前編、後編と続けたこの滑り台の話題から私たちはなにを学べるだろうか？ もちろん直接的には動摩擦係数が一定でないことに気づくことであり、教科書で学んだことを真理と思いきまないことの大切さである。しかし、その背景にはもっと根深いバイアスがあるように思う。それは、そも

そも運動方程式を立てて物体の運動を考えると
いう、物理学のイロハそのものに潜むバイアスであ
る。

私たちは、滑り台の上に箱が置いてあればその
箱を観察対象に選定する。そしてその運動を観察
したり、運動方程式を立てて時々刻々、その位置
を解析したりする。そのとき、どうして金属板表
面の鉄原子一つ一つは、個々の観察対象から外し
て十把一絡げに「環境」としてひとまとめにする
のだろうか？ そこにビリヤードの球が二つだけあ
る状況なのであれば、決してそのような雑な扱
いはしないだろう。鉄原子が小さいからか？ 数
が多すぎて手に負えないなら尊重しなくてよいの
か？

ローラー式は、なにを「環境」として主観的に
まとめて扱うかにバイアスがあることに気づく格
好の状況設定である。ローラーは鉄原子と違って
動きが目に見える。ローラーを個別の観察対象と
して扱うか、それともこれを環境の構成要素とみ
なすか、つまり摩擦として扱うかは私たちが自分
の好きなように決めればよい。

粗視化して環境とみなす態度は自然を忠実に客
観的に観察するという観点ではいい加減で、
「悪」である。しかし、情報を取捨選択して行動
に活かすという意味では、私たちにとっては智慧
であるのも確かである。

主観を排して客観に徹する態度をよしとするな
らば、多数の個別の物体を精確に並列に観察して
処理を行うことが必要である。しかし、要素還元
主義と呼ばれる考え方にもつながるこの態度は、
唯一の正しい世界の捉え方であるとは言い切れな
いかもしれない。

滑り台を見ているだけで、私たちがどのような
態度で世界を眺めているか、そこに別の観方はな
いのか、様々な思いが巡る。楽しみは尽きない。

233 (1970)

5—秋葉康之:『クォーク・グルーオン・プラズマの物理』, 共立
出版(2014)

6—ガリレオ・ガリレイ:『天文対話(上)』, 青木靖三訳, 岩波文
庫(1959)p. 79

文献

1—村田次郎: 94, 463(2024)

2—松川宏:『摩擦の物理』, 岩波書店(2012)

3—加藤貞幸:『放射線計測』, 培風館(1994)

4—L. C. Northcliffe & R. F. Schilling: Nuclear Data Tables, A7,