

物理のポイント

物理の目的

- 1) 自然の**基本法則**を発見する
基本法則=**数学的**なモデル。**定量的**なモデル
- 2) 基本法則によって、あらゆる自然現象を**定量的**に説明する

言い換えると

- 1) **基本ラグランジアン**の発見
現代の物理はこれをほとんど達成している
素粒子標準モデルと一般相対性理論
- 2) **ラグランジアンを解く**
昔のやり方
解析的方法で解く
現代のやり方
解析的方法に加えて数値計算やシミュレーションで解く

「近似法則」と「基本法則」

- 物理法則には2種類ある

1) 近似的な法則

経験などにより、近似的にそれが「正しい」ことが知られている
ほとんどの法則がこれになる。

2) の絶対的な基本法則の近似として導出される

2) 絶対的な基本法則 (原理)

絶対的に正しいことが知られている

例 **光速不変** c が一定 (最大の速さ) 相対性理論

不確定性原理 \hbar が一定 (最小の力学的作用) 量子力学

2 A) 現時点で「基本法則」と考えられるもの

一般相対性理論

素粒子標準理論

一般的な用語では、より基本的はほうから以下の順になる

原理 → 理論 → 現象論・モデル

法則のヒエラルキーと有効範囲

- **ほとんどの物理法則は、それよりも基本的な法則の近似有効範囲とヒエラルキーがある。**

絶対的な法則が一番偉く、有効範囲がもっとも広い（無限）

それから近似により、有効範囲がせまくなっていく

例 一般相対論 → 特殊相対論 → 非相対論

一般相対論 光速 c が最高速度で一定 ($1/c > 0$)

特殊相対論 光速 c が最高速度で一定 ($1/c > 0$)。時空曲率 0 の近似

非相対論 光速が無限 ($1/c \rightarrow 0$ の近似)

日常的世界では、光速が無限であるという近似は十分にただししい。

だから、非相対論は、日常世界では「ただししい」。

しかし、速度が光速に近くなると、この近似の有効性が失われる。

RHICやLHCでの高エネルギー加速器実験では、粒子の速度はほとんど光速になる。だから、常に特殊相対論で考えなければならない

測定量には誤差がある。誤差も重要

- 測定には誤差がある。誤差がない測定は存在しない。
- だから、測定結果を示すとき、測定の中心値だけでなく、測定の誤差も示さねばならない。
- 誤差のない測定結果は意味がない
- 誤差は測定の中心値と同じくらい重要だと考えるべき

ある測定結果が 例えば

$$10 \pm 100$$

$$10 \pm 10$$

$$10 \pm 1$$

$$10.0 \pm 0.1$$

$$10.000 \pm 0.001$$

では全く意味がちがう

実験の目的は「モデルが正しくない」ことを示すこと

モデルや理論が「正しい」ことを証明することはできない

しかし、「正しくない」ことを証明することはできる

自然科学の基本ルール

実験結果に合わない理論は正しくない → 棄却または修正

歴史的には、この基本ルールが確立したことによって、はじめて「自然科学」が成立して、それが「進歩」するようになった。

それまで数千年にわたって、哲学者たちは「真理」について考えていた。しかし、理論の間違いを確立する手段がなかったために何の進歩もなかった

間違った理論を実験で「間違いだ」ということを示し、棄却・修正することによって、はじめて自然科学が進歩するようになった

理論・モデルを見つける意味

物理の目的

- 1) 自然の**基本法則**を発見する
- 2) 基本法則によって、あらゆる自然現象を**定量的**に説明する

何故「理論をみつける」ことがウレシイかといえは、それは2番目の「自然現象を定量的に説明する」ことにある。

正しい理論を知っていれば、その理論によって、「何が起こるか」を「定量的」に予言することができる。

何が起こるかが予言できることが、理論の持つ有用性

自然現象を**予言**できるから、自然を**理解**できたことになり、それにより自然を**支配**することができる

「**自然現象を定量的に正確に予言出来る**」ことがウレシイ

近似モデルであっても、その有効範囲であれば、正確な予言ができる。だから、近似モデルであっても有効範囲では十分有用な法則になる。

経験則の有用性と限界

自然現象のモデルは、当初は「経験的」に発見されてきた

経験的に、「これがいつも成り立っている」ことが知られていて、それに基づく「経験則」がえられていた

経験則は、日常的な世界では成り立つ「正しいモデル」

例 非相対的な速度の加法則（ガリレイの相対論）

$$v = v_1 + v_2$$

これは、速度が光速に対して無視できるほど小さい場合は「正しい」。相対論的な式からのずれは $(v/c)^2$ なので、 $v = 360 \text{ km/h} = 100 \text{ m/s}$ の場合でも $v/c \approx (10^2 \text{ m/s}) / (3 \times 10^8 \text{ m/s}) \approx 3 \times 10^{-7}$ なので、ずれの大きさは 10^{-13} になり、無視できる

しかし、 v が光速に近くなると正しくなくなる。加速器実験での粒子速度はほとんど光速なので、常に特殊相対論の式をつかって計算しなければならない

経験則は「正しい」。しかしそれには有効限界がある

経験や常識は正しいとは限らない

- 物理法則に限らず、多くの「ルール」は経験則。
- 経験則は、日常世界の経験から抽出されたもの
- 「常識」と呼ばれることもある
- 日常世界では、経験則や常識は常に「正しい」。常識に反することをすると、大抵の場合、困った結果を招くことになる。常識にしたがい、経験則に従うのが「正しいやり方」
- しかし、経験則や常識には「有効範囲」がある。日常世界からはずれたところでも、経験則や常識が有効であるとは限らない。
「日本の常識は世界の非常識」
- 物理実験では、非日常的な現象を扱っている。だから、日常常識が正しいと考えてはいけない。
- 前ページの例でいえば、相対論の「光速一定」の方が正しい基本法則で有効範囲が広い。ガリレイ的に速度の加法則 ($v = v_1 + v_2$) は $v \ll c$ の時に成り立つ有効近似にすぎない

実験で理論の間違いを見つける意味

- 物理実験の目的は、これまで正しいと考えられていた理論の限界を試し、その間違いを見つけることにある。
- 全ての理論は、結局のところ、有効な近似モデルにすぎない。ある理論が正しいことなど証明できないし、先験的に正しいことは分からない。
- 理論の予言を実験で検証する。もし予言が実験と会わなければ、理論が間違っていたことになる。これは、実験での検証によって、理論の有効範囲を決めたということだ。
- この場合、理論に修正をして、実験と合うようにする。こうすることで、有効範囲が広い、「より正しい理論」「より基本的な理論」が得られることになる。
- 実験の目的は、理論の間違いを発見して、理論に修正を強いることにある
- この実験による理論の修正を繰り返すことによって、物理は進歩してきた。

物理は、「問題の単純化」

- 自然現象は、通常は非常に複雑なもので、いろいろな要因が絡まっている。だから、そのままでは理解することができない。
- 物理では、複雑な問題を単純な問題に分解して、その単純化した問題を解く。
- 複雑な問題は、単純な要素の組合せとして解釈する。
- 単純な問題を記述するのが、基本法則。
- 問題の単純化 → 基本法則の発見
- 複雑な現象を基本法則で定量的に理解できる単純な問題の組合せで記述する。
- 実験では、非常に単純な状態を作って実験をして、基本法則を検証する

ビーム衝突実験は「単純化」

- 加速器を使ってビーム衝突実験をするのは、単純化するため
- ビームとビームをぶつけて、そこで起こる反応をみる。
- 2粒子間の反応、という最も単純な状況を作り出して、それを調べる。
- この単純化をもっとも押し進めた場合が、電子-陽電子衝突実験。素粒子である電子と陽電子の反応を調べている。

ただし

RHICやLHCの少し違う。残念ながらクォークやグルーオンは単体では取り出せない（閉じ込め）

- 1) 陽子同士を衝突させて、クォーク・グルーオン間の相互作用の研究をする。
- 2) 原子核衝突でQGPを生み出して、QGPの性質を研究する
- 3) 新粒子を発見する（LHCの高エネルギー物理のの区的）

電子・陽電子消滅にくらべると複雑になるが、しかし、目的とする物理研究の手段としては、もっとも単純化した方法になっている。

単純化の例: テストビーム実験

- INTTの開発のために、2021年の暮れに東北大学ELPHでテストビーム実験をおこなった。
- これは、INTTのラダー1台の性能を確認するために、「テストビーム実験」という非常に単純化された実験をしている。
- 実際にINTTを使用する状態では、56ラダーを、ビーム衝突点から生じる様々な粒子を測定する。これは非常に複雑な状態なので、それからINTTの性能を調べるのは難しい。だから、sPHENIX実験を開始する前に、ビームテスト実験という単純化した状況で、INTTの性能を精密に調べた
- ビームテスト実験では、
 1. エネルギー、位置、方向の分かったビーム粒子（電子）を
 2. 1度に1発だけINTTにあてるという非常に単純な状態をつくって、実験している

シミュレーションも単純化・理想化のため

- 物理実験のデータ解析では、「シミュレーション」を行って、それをデータ解析に利用している。なぜか
- これは、実際の実験は単純ではないため。理想的には調べたい反応だけが起こるように実験をしているのだが、現実の実験では余計なバックグラウンドがあったり、望ましくない副反応が同時に起こっていたりする。
- こうした「余計な効果」で、測定したい「理想的な実験結果」がどのように歪んでいるかを調べるためにシミュレーションをする。

例 発生粒子（例えば光子）のエネルギー分布の測定

理想的には、エネルギー分解能が無限に良いカロリメータで発生光子のエネルギーを測定すればよい。測定された分布がそのまま求めたい「光子のエネルギー分布」になる。

しかし、実際のカロリメータは分解能がある。1 GeVの光子に対するエネルギー測定値は $1.0 \text{ GeV} \pm 0.1 \text{ GeV}$ くらいになる。また、測定によるエネルギー測定値の分布は、ガウス分布とは限らない。

シミュレーションも単純化のため (2)

- シミュレーションで、エネルギー分解能の効果で「測定されたエネルギー分布」が「元のエネルギー分布 (正解)」からどうずれるかを調べる
- この測定器のレスポンスによる効果をシミュレーションで正確に調べておけば、「測定したエネルギー分布」から「元のエネルギー分布」 (測定したい正解) を復元することができる。
- 実際の実験
真の分布 \rightarrow (測定器効果) \rightarrow 観測した分布
これは「畳込み」になっている
- シミュレーションで「測定器効果」を決定しておけば、この逆ができる
観測した分布 \rightarrow (測定器効果) の逆 \rightarrow 真の分布

何がより基本的で、より正しいかを知る

- 非常に抽象的な議論をしたと思っているのですが、ここまで話したことは、実は具体的な有用性がある。

- それは

「何がより正しいか」を知ることが大切だ
ということ。

学んだルールの中に矛盾があるように思う場合がある

実験などをしていると、矛盾した結果がでてくるように見えることがある。どちらが正しいか分からないので混乱する。

このとき、**矛盾した結果の中で、「より正しい方」を見極めることが問題解決の第一歩になる**