

素粒子物理学入門

～大雑把に理解できるようにするために～

山形大学 千代 勝実

この講義の目標

- ・ これ以降の講義や発表で、だいたいわかるようになるための暗黙の了解事項を勉強します。適当にデフォルメしてあります
 - ・ M1だけでなくB1の人でもわかるくらいに簡単に
 - ・ 計算はほとんどしません。厳密に理解するのは自律学修
- ・ 理論の学生は実験の、実験の学生は理論の話がある程度わかるように、感覚的に理解します
- ・ 標準理論などの説明はほとんどしません

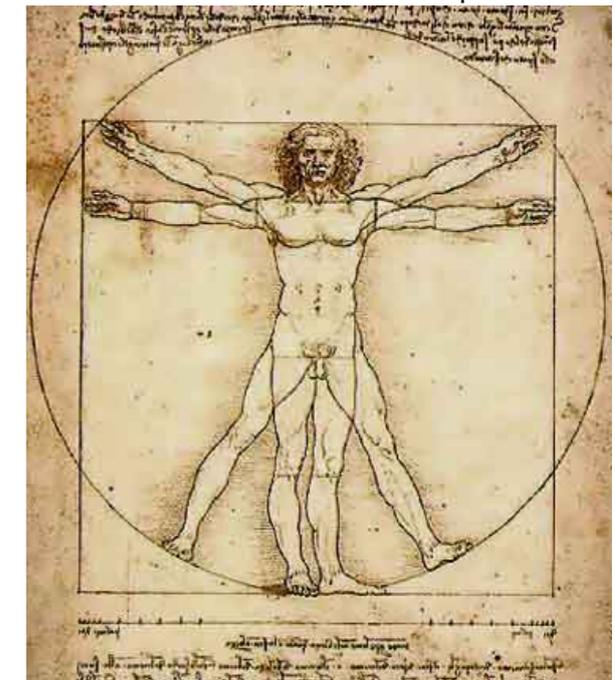
目次

- ・ 素粒子物理学の理念と前夜
- ・ 素粒子の場の量子論での概略的な捉え方
- ・ 覚えておきたい定数や関係
- ・ 素粒子の衝突と運動学の概略
- ・ 摂動計算とファインマン・ダイアグラム
- ・ 物体と粒子の反応、検出器の基礎
- ・ 簡単すぎる統計学

3つの究極の謎

宗教や神話、哲学や科学が行き着く人間にとって究極の問い

- 宇宙（世界）はどのように始まり、どのように終わるのか
- 全てをつかさどる究極原理は何か 今日はこれを考えます
- 人類はどういう存在なのか



Wikipediaより

物理学

- 物（モノ）と理（はたらく法則）を研究する

素粒子物理学

- 素粒子と理（はたらく法則）を研究する
- 最も基本的な物質と最も基本的な法則を研究する

考えていく上で重要な理念

- 還元主義

- 自然現象はすべて細かい基本的なパーツに分解することができて、それらの性質がわかれば、逆に組み合わせて理解できる

- 実証主義

- 実験的・論理的に正しい・存在するという証拠があれば、それが正しい・存在するとみとめてよい

興味がある人は

「科学哲学の冒険-サイエンスの目的と方法をさぐる」 戸田山和久 NHKブックス
を読んでみてください

素粒子物理学の目的

- 究極の素粒子とそれをつかさどる究極の理論を見つける
 - 世界の成り立ちや宇宙の始まり・終わりが説明できる
 - 人類が生まれてきた理由もわかるかもしれない
 - 神の理論?!
- 究極なのだから素粒子は少ないはず。理論も少ないはず。

素粒子物理学前夜

錬金術

- ・ 錬金術とは何か知っていますか？
- ・ 価値の低い物質（例えば鉛）を価値の高い物質（例えば金）に変える技術・魔術
- ・ 狭義には、なにかを金の元素に変えること

他の何からも作れない≡元素

- ・ 他の何からも構成されていない
→他の何からも作れない≡元素 という定義
- ・ 基本的な物質のことを一般に元素と呼びます

元素に構造があるという証拠

- ・ メンデレーエフの周期表(1869/1887年)
- ・ 放射能（放射線を発する性質）を持つ元素の発見(1896年)
- ・ 放射壊変の発見(1903年)
- ・ ラザフォード散乱の発見(1911年)

メンデレーエフの周期表

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

- ・ 元素の重さがおおむね整数比になっている
- ・ 元素の重さとその性質に周期性がある

			Ti = 50	Zr = 90	? = 180.
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182.
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186.
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,1.
			Fe = 56	Rn = 104,4	Ir = 198.
			Ni = Co = 59	Pi = 106,8	O = 199.
			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200.
H = 1	Be = 9,1	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112	
	B = 11	Al = 27,1	? = 68	Ur = 116	Au = 197?
	C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118	
	N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?
	O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?	
	F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	I = 127	
Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204.
		Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207.
		? = 45	Ce = 92		
		?Er = 56	La = 94		
		?Yt = 60	Di = 95		
		?In = 75,6	Th = 118?		

図表は断りがないものはWikipediaから引用

Д. Менделѣевъ

放射能の発見 (キュリー夫妻)

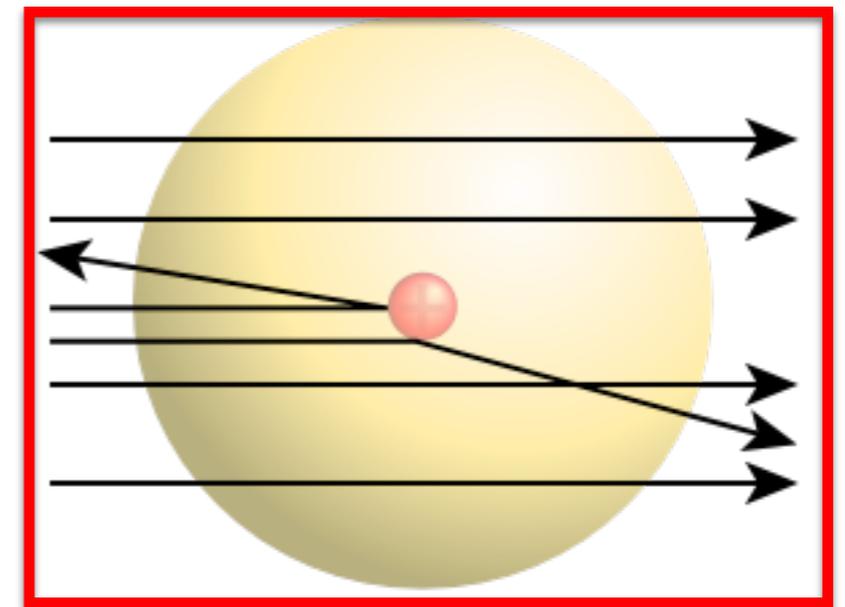
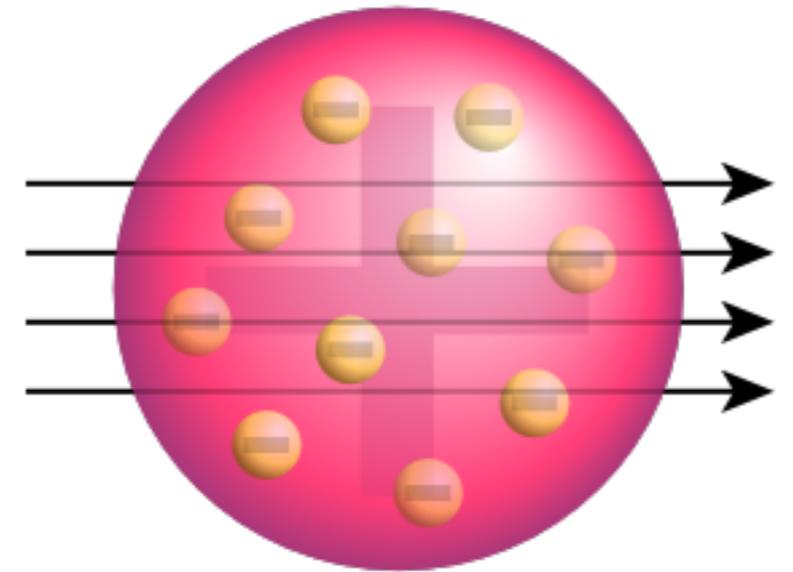
- ・ ポロニウム、トリウム、ラジウムの発見
- ・ X線に似た光線が化学的性質ではなく元素そのものから放射されることを発見
- ・ 温度を変えても、化合物にしても同じ量の光線がでる

放射壊変の発見

- ・ トリウムが放射線を放出してラジウムその他に変換していることの発見
- ・ 元素が放射線を放出して違う元素になることの証拠
- ・ 以下、元素を原子と呼びます

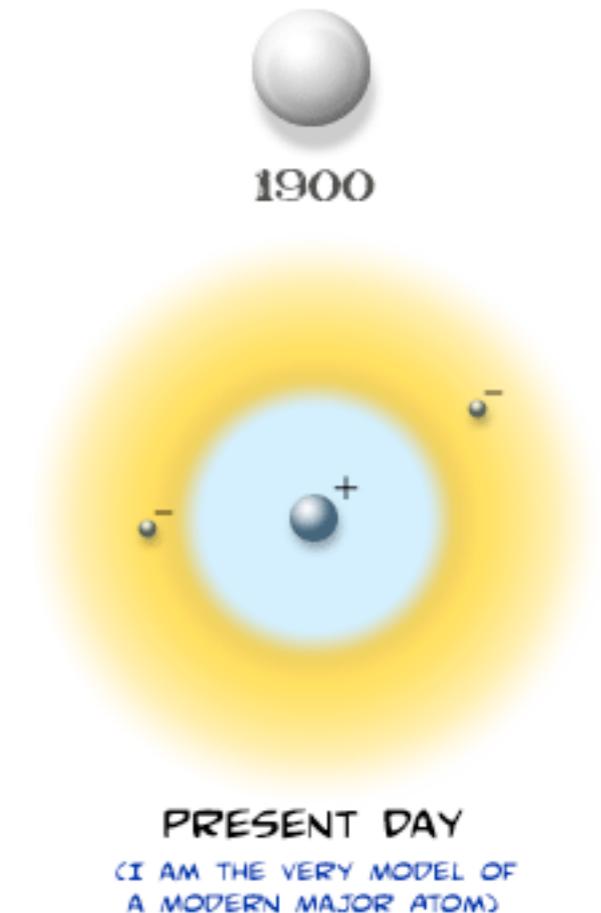
ラザフォード散乱

- 放射線を金原子に当てるとまれに透過せずに激しく跳ね返ってくる現象を発見
- 原子の中心に非常に重く固い物質が存在する証拠 (元素構造の解明)



原子とその構造

- ・ プラスの電気を持った原子核の周りを複数の電子が回っている原子
- ・ 分子のサイズ $1\text{nm}(10^{-9}\text{ m})$
- ・ 原子のサイズ $0.1\text{nm} = 1\text{Å} (10^{-10}\text{ m})$

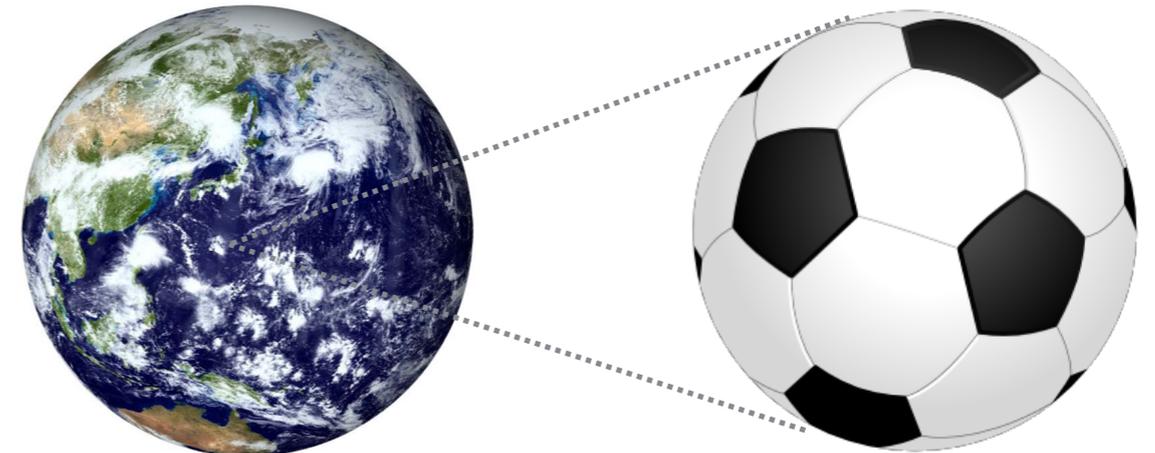
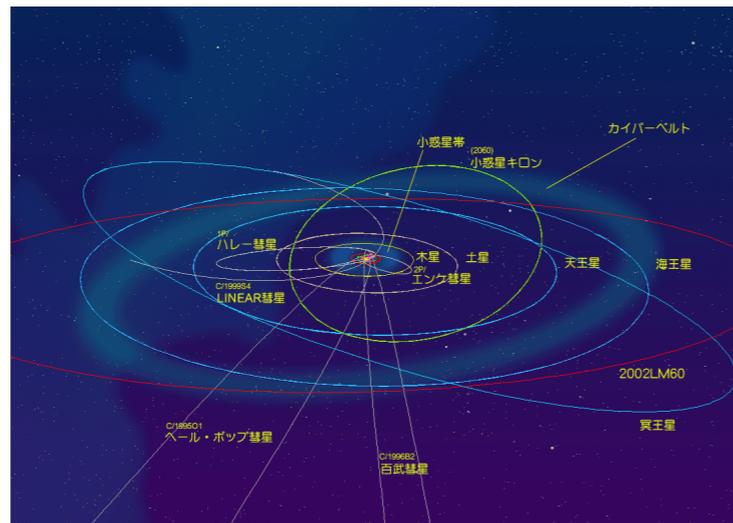


逆に大きい方に考えると $10^{10}\text{ m} = 10^7\text{ km}$

原子を 1m とすると、本当の 1m は月軌道サイズ

元素の中身

- ・ 元素（原子）のサイズ $0.1\text{nm} = 1\text{\AA} (10^{-10}\text{ m})$
- ・ 中心の原子核のサイズ $1\text{ fm} = 10^{-15}\text{ m}$ (10万分の1)



イメージとしておおざっぱに考える。

太陽系を 1m と考えると ($2 \times 10^{12}\text{ m} = 2\text{億km}$)

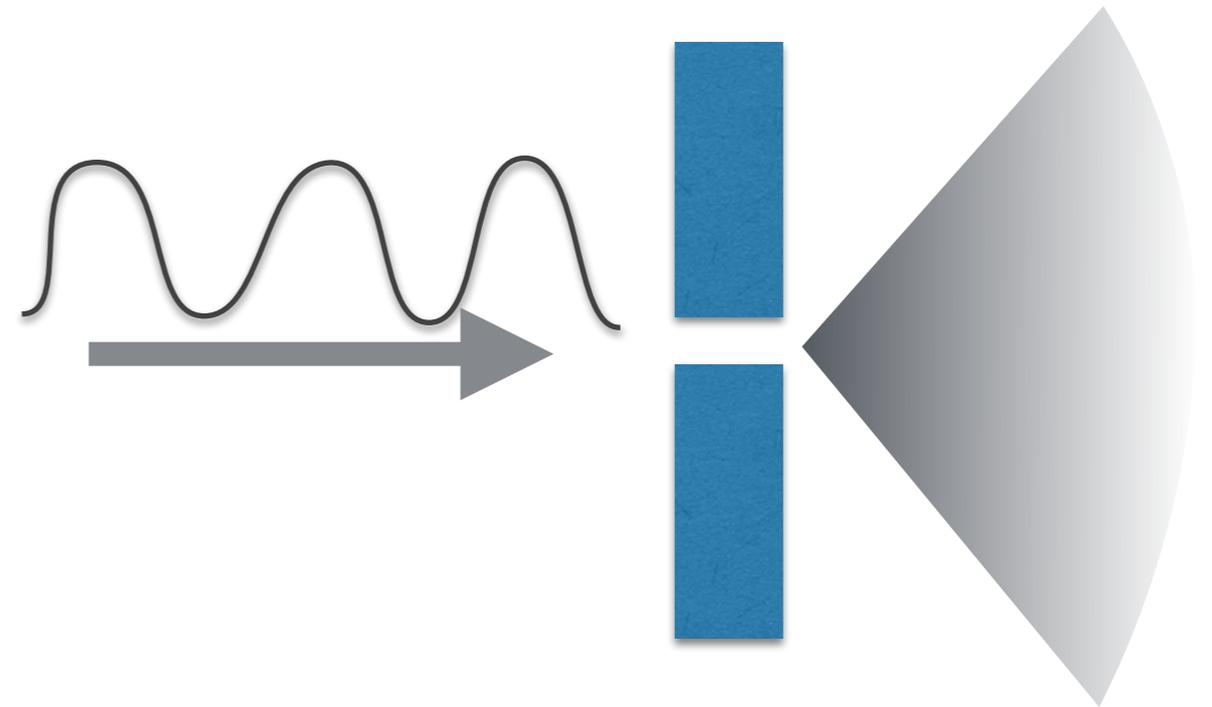
地球サイズ (13000km) が原子のサイズ、

サッカーボールが原子核のサイズ (地球の重さのすべて)。他は真空

原子ははっきり言ってスカスカ

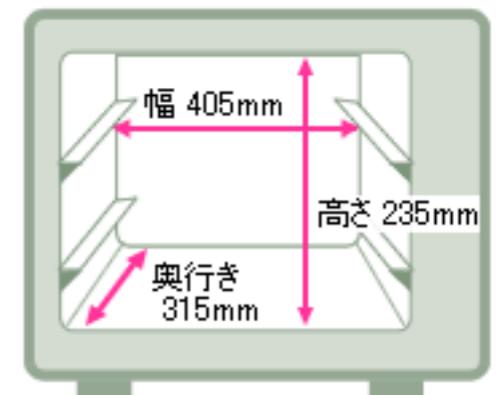
スカスカに見えない理由

- 光の波長(400-700nm)より原子のサイズが小さい(0.1nm)ので、回折現象により光が散乱・反射してしまう(フレネル回折)



電子レンジの電波の半波長は約8cm、扉の穴は5mm以下で、電波が外に漏れてこない(電子レンジの中のサイズは電波が共振するよう約8cmの倍数になっている)

● 庫内有効寸法(加熱室有効寸法)



シャープのウェブページより

電子レンジ

可視光では中が透けて見えるが、マイクロ波(8cm)では普通の壁のようになる



波長の短い光を使う

- ・ X線 (波長0.001-10nm)は波長が原子より小さいので物質を透過できる。水や皮膚・内臓を透過し骨を透過しにくい波長を選ぶと骨を写せる

- ・ X線は目には見えないので、マンガのようにX線を当てただけで骨が見えたりはしない

(乾板、イメージングプレートもしくはデジタルX線センサーを使う)



- ・ X線は有害

1895年ドイツ人のレントゲンが発見
(第1回ノーベル物理学賞)

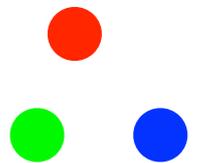
イントロ：まとめ

- ・ 原子は原子核とその周りにある電子で構成される
 - ・ このような原子像は1900-1910年頃確立
- ・ 原子は 10^{-10}m 、原子核は 10^{-15}m で模式的な絵で見られるより想像を絶するくらい小さい
- ・ 物質のサイズより波長が小さくないと中身が見えない

場の量子論の概略

場の量子論とは

- ・ 真空中にエネルギーが集まっている場所があって、それを素粒子とする
- ・ 真空 = ディスプレイ
- ・ ドット (ピクセル) = 素粒子(点) ●
- ・ ドットの色やらなんやら = 粒子の種類や性質
電荷や質量、スピンや運動量などの保存量も含まれる
パラメータ (性質・特徴)

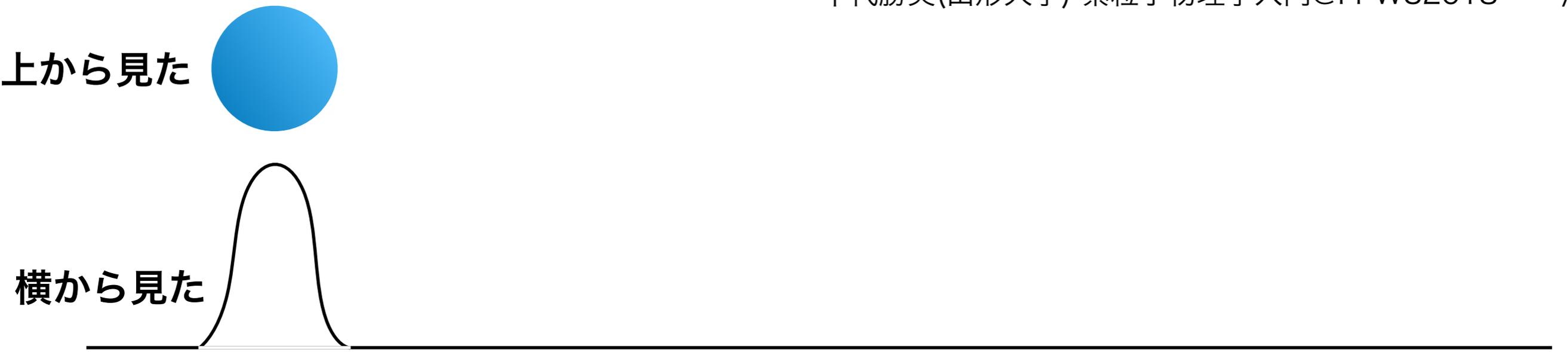




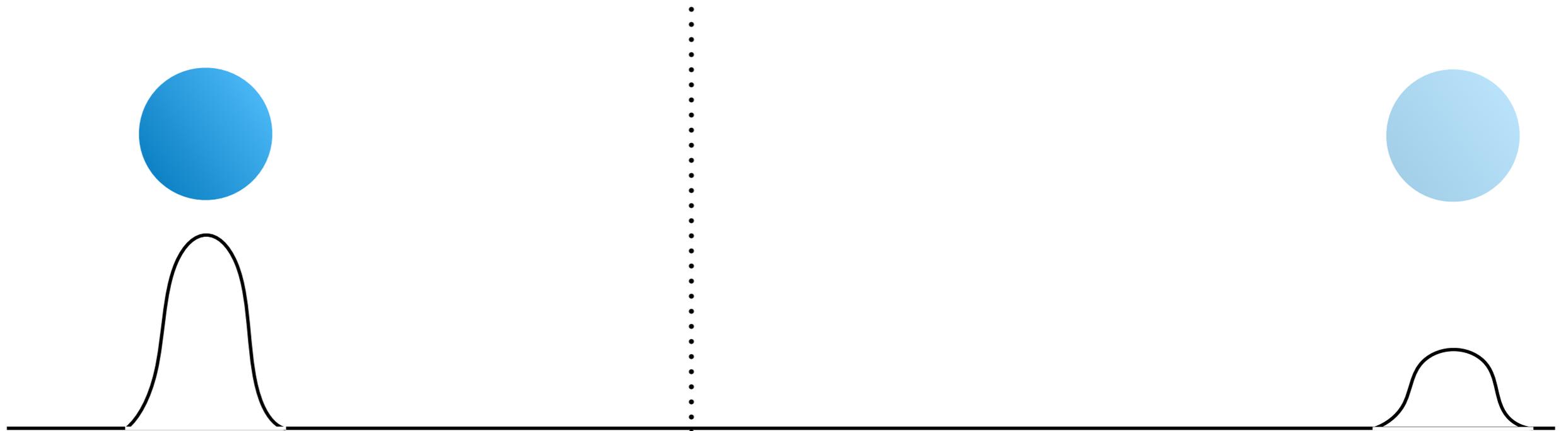
- ・ 真空中にできたエネルギーの塊としての素粒子は、シーツのシワやスマホ保護シートの気泡みたいにくっついていたり別れたりはあるが、なんらかの痕跡は残る
- ・ 凹んだ部分と凸んだ部分が衝突すると、消える
とつるではなくつばくむ

場の量子論的粒子の性質

- ・ ディスプレイのドットやシーツのシワ、気泡のように考えると、場の量子論的粒子の性質が簡単になる
 - ・ 複数の同じ粒子の区別がつかない
 - ・ 素粒子が対消滅・生成したり変化したりする
 - ・ 同じパラメータで1箇所に重なって居られる/ない
 - ・ パラメータが粒子の性質を決める・IDする

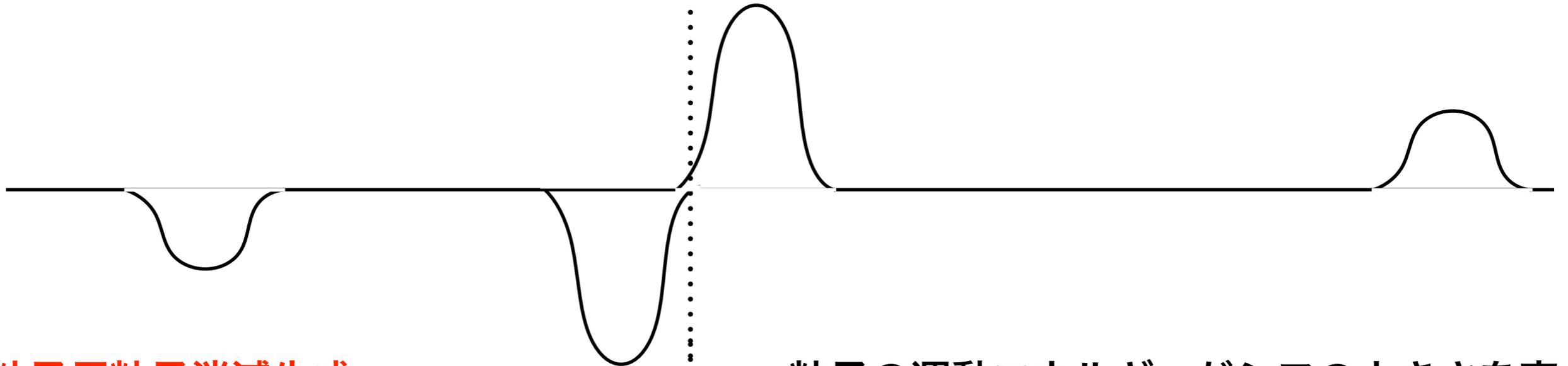
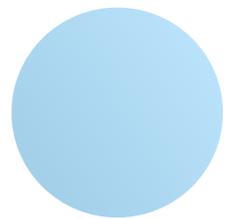
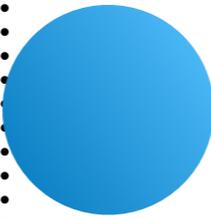
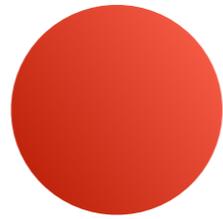


単純移動



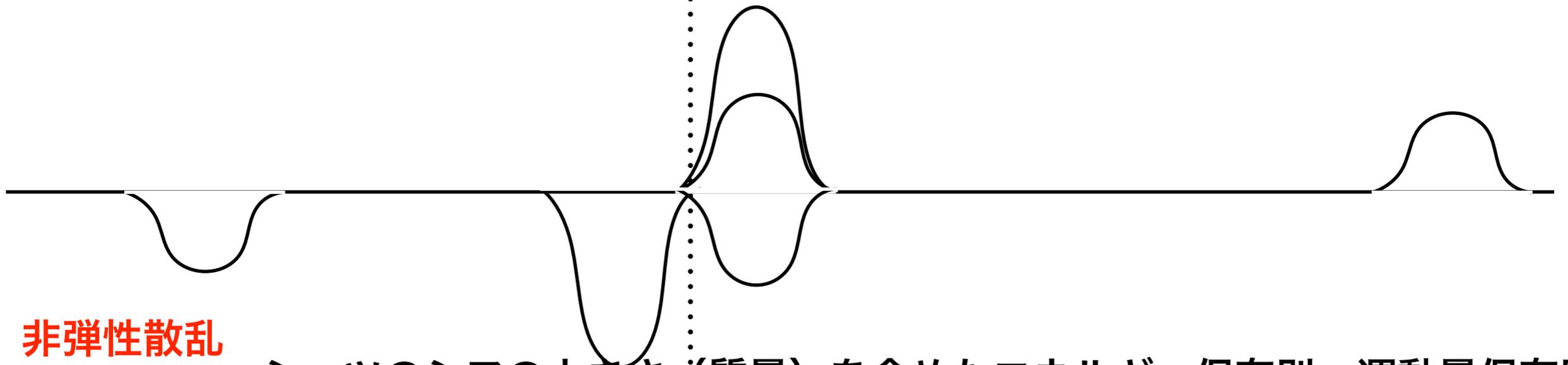
弾性衝突

シーツのシワの大きさ（質量）を含めたエネルギー保存則・運動量保存則などもろもろの保存則は守られている



粒子反粒子消滅生成

粒子の運動エネルギーがシワの大きさを変える！



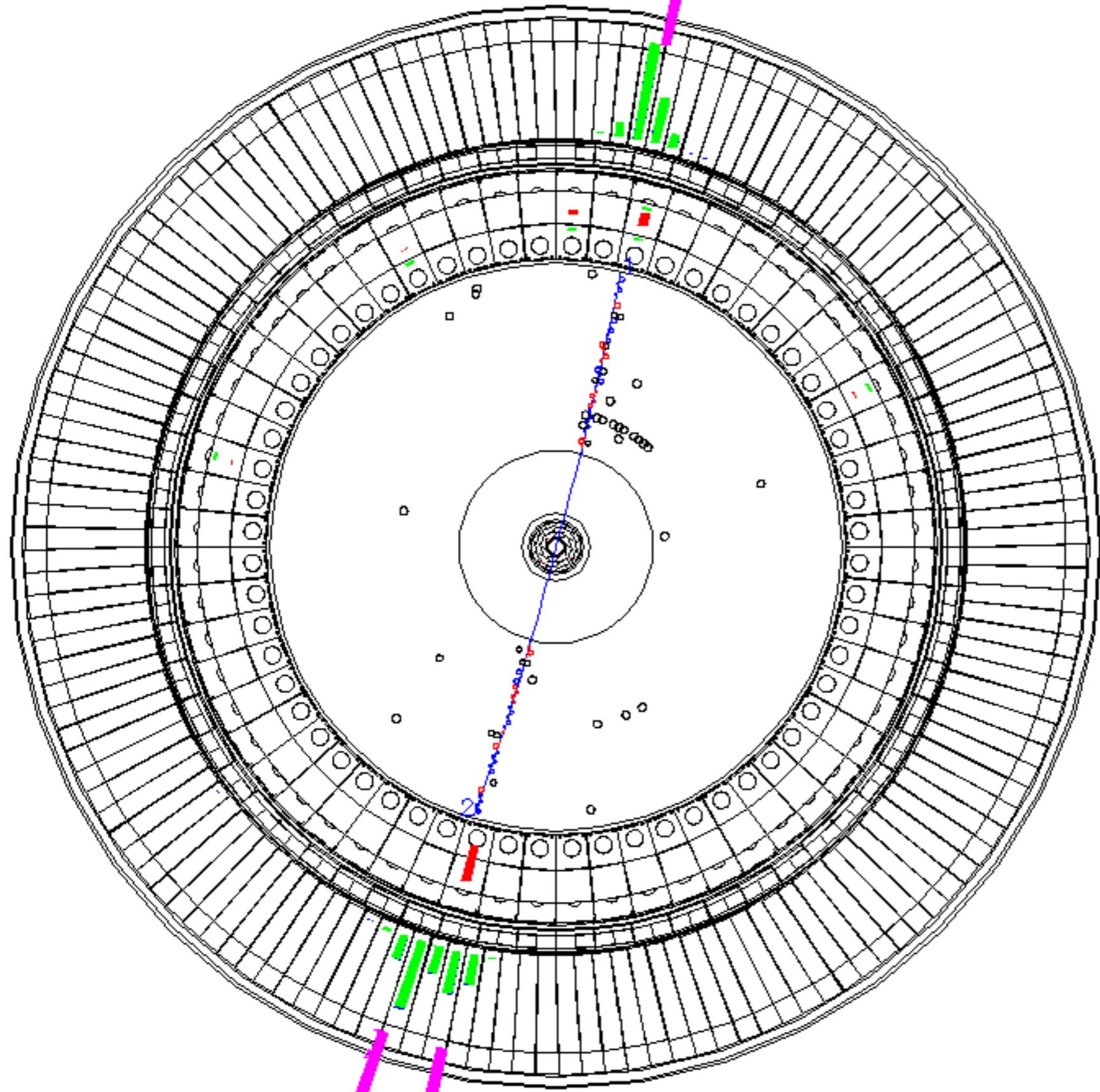
非弾性散乱

沢山の粒子が生成

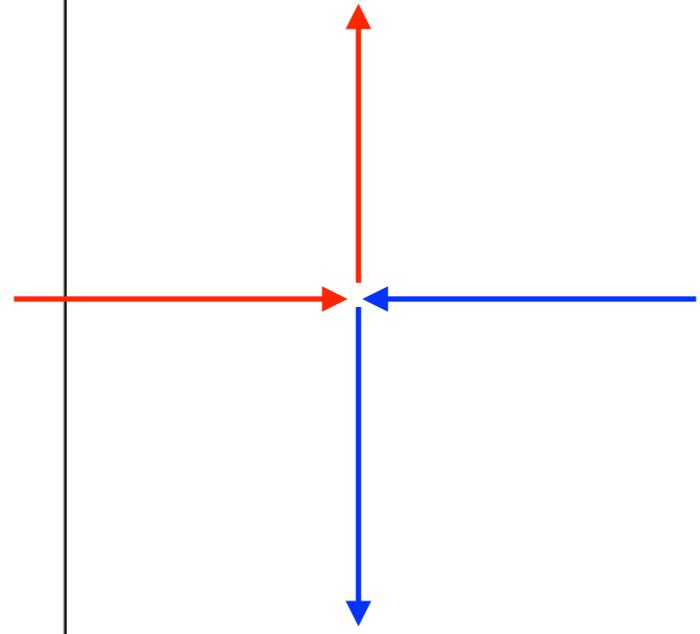
シーツのシワの大きさ (質量) を含めたエネルギー保存則・運動量保存則などもろもろの保存則は守られている

Exp 3 Run 25 Farm 5 Event 60
Eler 8.00 Eler 3.50 Date/TIME Tue Jun 1 11:23:08 1999
TrgID 0 DetVer 0 MagID 0 BField 1.50 DispVer 2.01

BELLE



運動量保存則が
成り立っている



10 cm

3

2

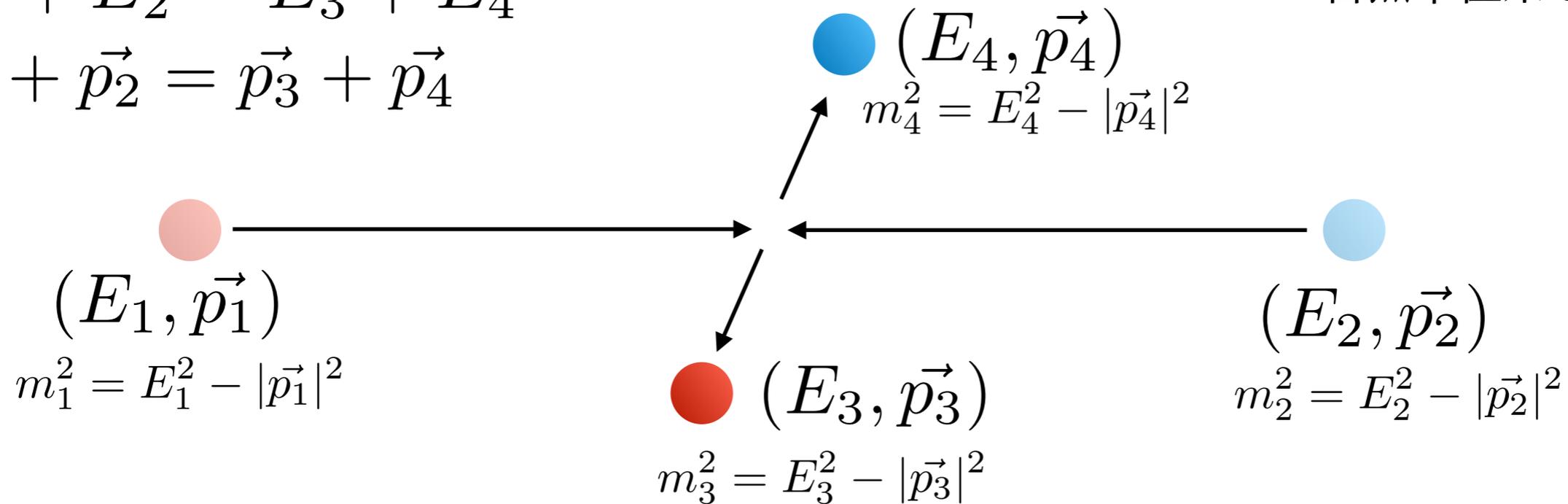
相対論的な

エネルギー E と運動量 p の保存

$$E_1 + E_2 = E_3 + E_4$$

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_3 + \vec{p}_4$$

自然単位系 $c = \hbar = 1$



- エネルギーと運動量を組み合わせた4元運動量
- 粒子の質量はエネルギーと運動量の関係から導出
 - エネルギーが保存していれば反応前後で総質量が変わってもよい

粒子の種類を決めるパラメータ の例

- ・ 質量
- ・ エネルギー・運動量・（軌道）角運動量・スピン
- ・ チャージ・フレーバー
- ・ パリティ等
- ・ 上記いくつかの状態の量子力学的混合（混合角を通じて）
 - ・ ハドロンなど複合粒子でも同じことが言える

ここまでのまとめ

- 素粒子はこれまでのように模式的にはパチンコ玉やビー玉のように考えてもいいが、真空の性質として存在している
- 素粒子は内部構造はないが、真空の性質から、さまざまな素粒子を（ときどき）生成したり消滅したりできる
- 真空のシワ（素粒子）が衝突しているいるなことが起きることが法則の中に組み込まれている（相互作用）
- それでもエネルギーや運動量、その他の保存量は保存している（これが物理）、反応の前後で粒子は変わってもよい

覚えておきたい事

単位系

- 理論計算には自然単位系を使い
実験ではSI他の単位系を使う

- 接頭辞

フェムト	ピコ	ナノ	マイクロ	ミリ
f	p	n	μ	m
:	:	:	:	:
10 ⁻¹⁵	10 ⁻¹²	10 ⁻⁹	10 ⁻⁶	10 ⁻³

キロ	メガ	ギガ	テラ
k	M	G	T
:	:	:	:
10 ³	10 ⁶	10 ⁹	10 ¹²

- エネルギー

ケ ヴ	メ ヴ	ジェ ヴ
keV	MeV	GeV
=	=	=
10 ³ eV	10 ⁶ eV	10 ⁹ eV

- 長さ

フェムトメートル
fm
=
10 ⁻¹³ m

よく使う定数など

$$\hbar c \sim 197 \text{ MeV fm} \sim 200 \text{ MeV fm}$$

(自然単位系からの変換に頻出)

$$\text{光速度 } c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\text{プランク定数 } h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

$$\text{エネルギー } 1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{質量 } 1 \text{ MeV}/c^2 = 1.6 \times 10^{-13} \text{ J}/c^2 = 1.78 \times 10^{-30} \text{ kg}$$

$$\text{微細構造定数 } \alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \sim \frac{e^2}{4\pi} (\text{自然単位系}) \sim \frac{1}{137}$$

$$\text{相対論 } \beta = \frac{p}{E} = \frac{v}{c}, \quad \gamma = \frac{E}{m} = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}},$$

τ : 平均寿命
 $c\tau\beta\gamma$: 走行距離
 $c\tau$: $p \sim m$ の時の
 走行距離

計算ではなく概念を理解する

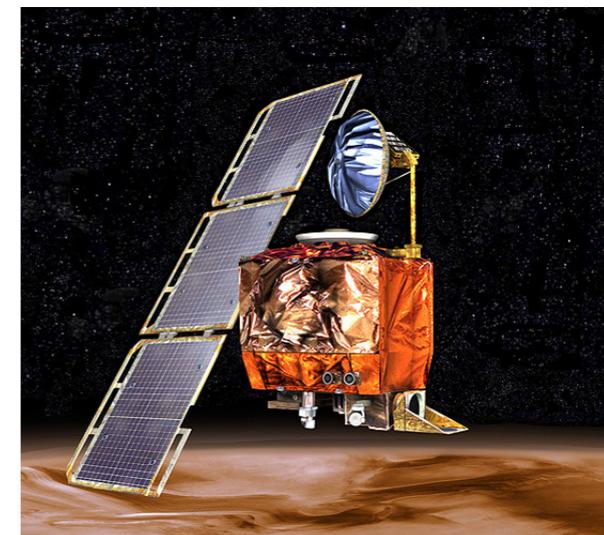
- $3141 \times 7852 = 24663132$
(小学校4年の算数)
→約 $3000 \times 8000 =$ 約 24000000
- 大事なものは厳密な数字が出せることではなく、桁が合っているかとかどのくらいの精度で計算する必要があるか

桁の間違いはダメ

- 計算間違いは自分や会社・社会に大きな災害を招く
- 指数表記 $a \times 10^n$
 - a は間違ってもよいが n はだめ。

火星探査機～マーズ・クライメイ イト・オービターの事故(1999)

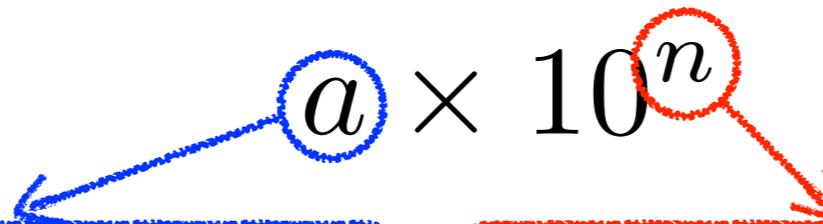
- 火星突入の際に計算間違い（地上局でヤード・ポンド法での計算を送信。探査機のコンピュータはメートル法で計算、4.5倍速い突入速度）
 - 火星大気で消滅
- 同時期のマーズ・ポーラー・ランダーもほぼ同様の事故で失敗しマーズ・サーベイヤー2001計画もキャンセル
 - 2000億円の損害



株大量誤発注事件(2005)

- みずほ証券の新人担当者が61万円の株1つ売る、という注文を1円で61万株売りと誤入力
- 1株当たり61万円の損失、それが61万株で最終的に407億円の損失(ファットフィンガーシンドローム)
- 担当者・証券会社・東京株式市場それぞれに責任

間違いの原因

$$a \times 10^n$$


- a そのものの四則計算ミス
- 単位系変換のミス (メートル法とポンドヤード法、ラジアンなど)

- n そのものの四則計算ミス
- 接頭辞変換のミス (キロやミリ等)
- 単位系変換のミス (メートル法とポンドヤード法、ラジアンなど)
- n の暗算によるミス

間違いの原因

$$a \times 10^n$$

- a そのものの四則計算ミス
- 単位系変換のミス (メートル法とポンドヤード法、ラジアンなど)

安全係数 (3倍違ってても大丈夫なように設計)

飛行機などの場合1.5、ダムは10など

たいてい桁も違ってくる

a の計算ミスだけで破滅的なことは起きにくい

間違いの原因

$$a \times 10^n$$

桁の違いは安全係数
では補償できない
接頭辞の変換は
頻度が高い

角度や時間の変換も頻度が高い、メートルとインチなども多い

電卓に入力せず暗算することが多い

- n そのものの四則計算ミス
- 接頭辞変換のミス(キロやミリ等)
- 単位系変換のミス (メートル法とポンドヤード法、ラジアンなど)
- n の暗算によるミス

結果が10倍違うと致命的

理工系の人気が気をつけるべきこと $a \times 10^n$

- コンピュータで諸条件を厳密に入れて精密に計算しない限り、 a の部分を電卓できちんと計算することは意味がない。暗算でよい。安全係数が助けてくれる。
- n (桁・指数部分)が致命的。考え方と桁が合っていれば正解。87点の答案が82点でも気にしない人は多いが、100点の答案が10点や1点になっても気にしない人はいない。桁 n や単位は a の10倍も100倍も重要。
- 単位を書かなければ、計算は何の意味もない。単位系や接頭辞、時間やラジアンの変換、対数記号(\log , \ln)が出てくる場合は計算手順中の単位は答案で要求されなくてもまちがえないためには最重要。

桁 (と単位) が合っていれば2倍半分OK、OK

有効数字について

- 桁で精度を考えるやり方（それほど精密ではない）
- 測定値と考えられる数字のみ有効桁がある。数学的定数（円周率 π ）や線形操作（ \times 倍）、定義された自然定数（光速度のみ）には有効桁を考えなくてよい（有効桁は無限と考える）
- 有効桁（69300なら3桁、0.0208は3桁）
- かけ算・割り算では計算の中で最も少ない桁数が有効桁になる
 284×3.1 の答えは2桁 $880.4 \rightarrow 880$
- 足し算・引き算ではもっとも位取りの大きなものに合わせる
 $284 - 3.1 = 280.9 \rightarrow 281$

よく使うが説明のない用語

- ・ **なんとかジェネシス** (宇宙の始まりにその粒子種が発生すること)
- ・ **ステライルニュートリノ** (重力以外と反応しないニュートリノ)
- ・ **なんとか混合** (ある粒子が2つの状態間を量子論的に行ったり来たりすること)
- ・ **湯川相互作用** (フェルミオン・フェルミオン・ボソンが一点に集まる相互作用・交点、ボソンはヒッグスなど)
- ・ **トリガー** (実験イベントが発生した時に欲しい特徴を持っているものだけ採るアルゴリズム)
- ・ **キャリブレーション** (実験装置が正しい結果を出すよう標準的な事柄や値と合わせること)
- ・ **ブラインドアナリシス** (実験データのうち本当にほしいシグナル部分だけ事前に取り除いておき、結果を見ながら解析できないようにすること)

測定器で直接測定できる

寿命の長い粒子

電磁カロリメータ

軌跡検出器

粒子識別検出器

ハドロンカロリメータ他

光子 γ スピン 1 質量 0、寿命無限大、電磁相互作用を媒介

電子 e スピン 1/2 質量 $m_e = 0.511\text{MeV}/c^2$ 、寿命無限大、電荷 -1

π^\pm 中間子 スピン 0 質量 $m_{\pi^\pm} = 139.6\text{MeV}/c^2$ 、 $c\tau = 7.8\text{m}$ 、電荷 ± 1

K^\pm 中間子 スピン 0 質量 $m_{K^\pm} = 493.7\text{MeV}/c^2$ 、 $c\tau = 3.7\text{m}$ 、電荷 ± 1

陽子 p スピン 1/2 質量 $m_p = 938\text{MeV}/c^2$ 、寿命 $> 2.1 \times 10^{29}\text{yr}$ 、電荷 $+1$

μ 粒子 スピン 1/2 質量 $m_e = 105.6\text{MeV}/c^2$ 、 $c\tau = 659\text{m}$ 、電荷 -1

K_L 中間子 スピン 0 質量 $m_{K^0} = 497.6\text{MeV}/c^2$ 、 $c\tau = 15.3\text{m}$ 、電荷 0

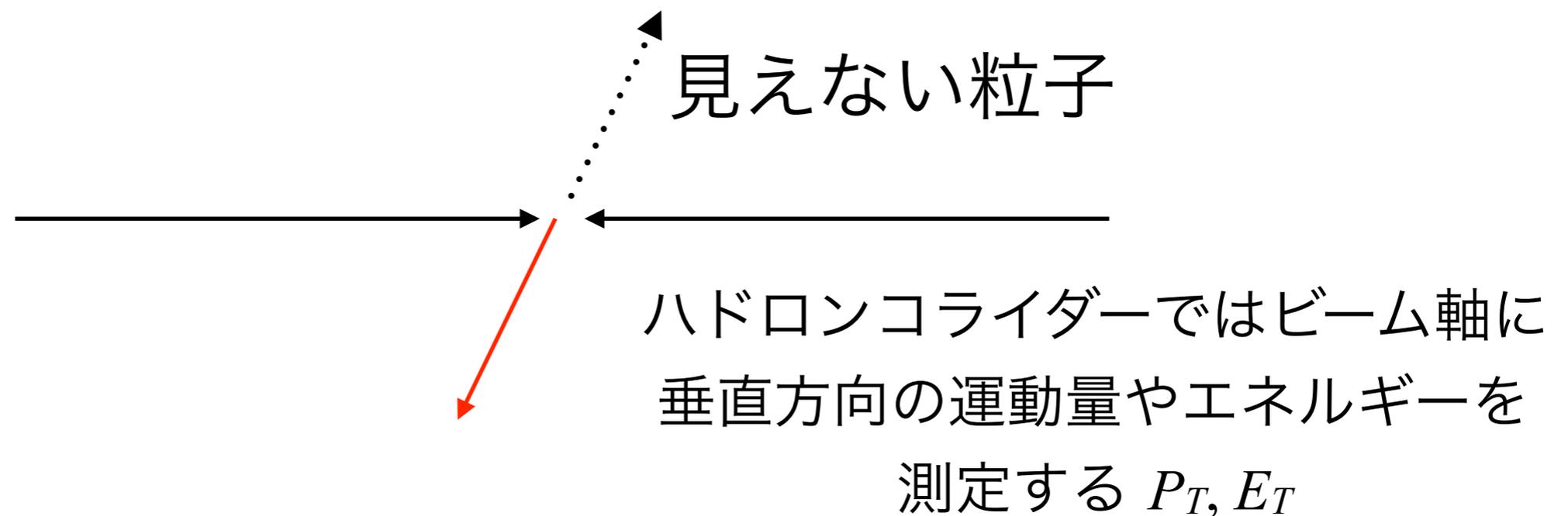
中性子 n スピン 1/2 質量 $m_n = 939.5\text{MeV}/c^2$ 、 $c\tau = 2.6 \times 10^{11}\text{m}$ 、電荷 0

測定器がほぼ反応しない粒子

ニュートリノ

超対称粒子など新粒子

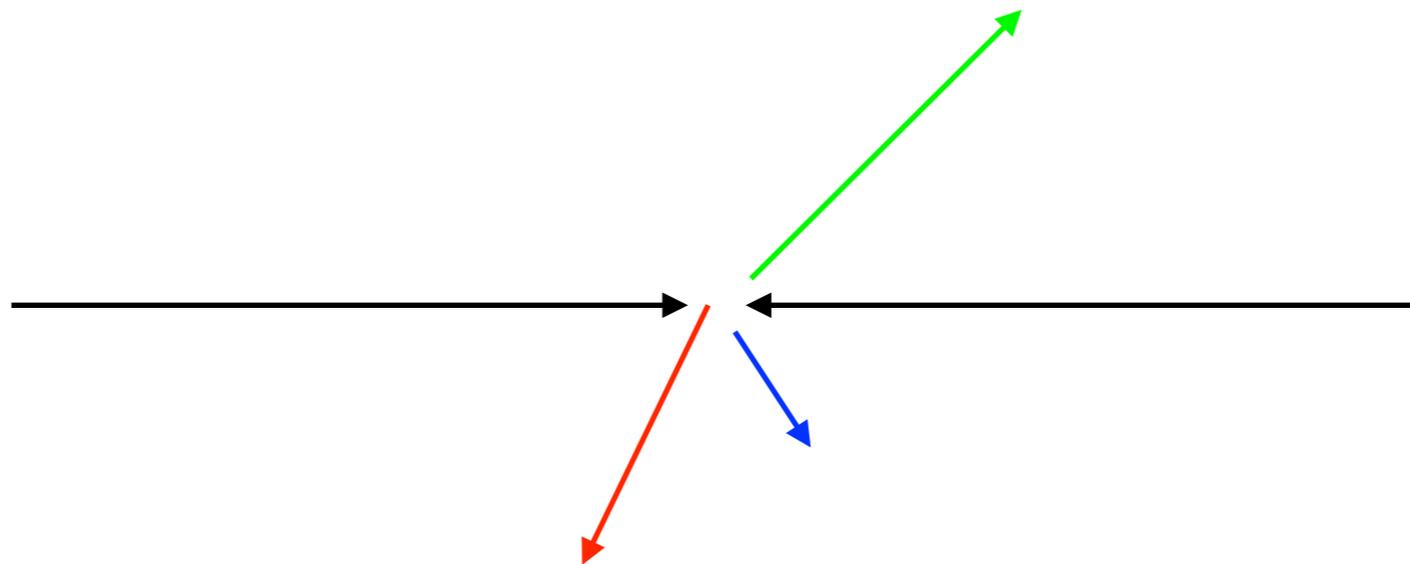
測定できる粒子を再構成して、
存在するはずなのに見えないエネルギーや
運動量・運動学的関係を用いて再構築する



寿命が短い粒子・共鳴

ほとんどの粒子・素粒子（ヒッグスとか）

測定できる粒子と見えない粒子を再構成して、
エネルギーや運動量・運動学的関係を用いて
再構築する



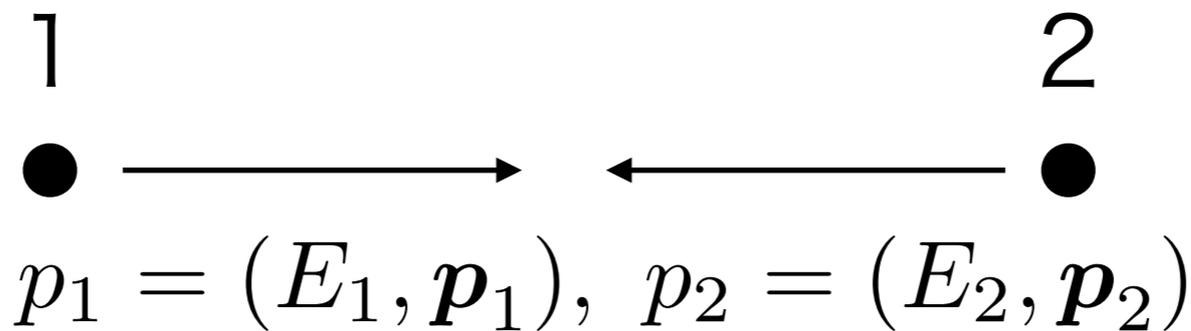
まとめ

- ・ 単位や桁は重要です。10倍間違っていると絶望的につらい！
- ・ ここで出てきた定数はオーダー+1桁、できれば2桁くらいまで覚えておくと、素粒子の議論が理解しやすくなります
- ・ 実験で測定できる粒子は限られていますが、寿命の短い・測定できない粒子も様々な情報を利用して存在や性質を推定することができます
- ・ ギリシャ文字を書けるようになりましょう。

素粒子の衝突

2体の不変質量

重心系



$$p_1 = (E_1, \mathbf{p}_1), \quad p_2 = (E_2, \mathbf{p}_2)$$

$$\text{ただし } E_1^2 = p_1^2 + m_1^2, \quad E_2^2 = p_2^2 + m_2^2$$

この2体系の不変質量の2乗を求めると

$$s = (E_1 + E_2)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2$$

重心系だとすると

$$= (E_1 + E_2)^2 - 0^2$$

$$\underline{\underline{\sqrt{s} = E_1 + E_2}}$$

2体の不変質量

実験室系



$$p_1 = (E_1, \mathbf{p}_1), \quad p_2 = (E_2 = m_2, 0)$$

$$\text{ただし } E_1^2 = p_1^2 + m_1^2, \quad E_2^2 = p_2^2 + m_2^2$$

この2体系の不変質量の2乗を求めると

$$s = (E_1 + E_2)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2$$

実験室系だとすると

$$= (E_1 + m_2)^2 - p_1^2 = E_1^2 - p_1^2 + 2E_1 m_2 + m_2^2$$

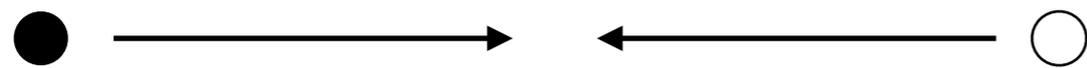
E_1 が m_1, m_2 より十分大きいと

$$= 2E_1 m_2 + m_1^2 + m_2^2$$

$$\sqrt{s} \sim \sqrt{2E_1 m_2}$$

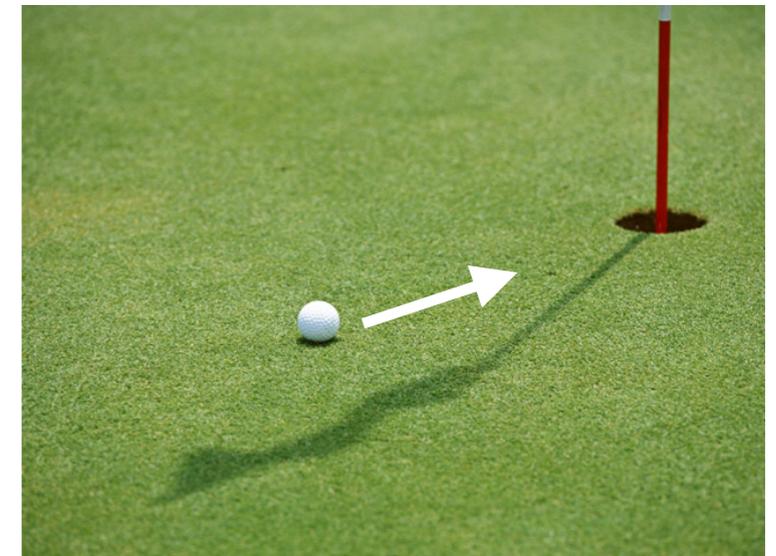
粒子と粒子の衝突とは？

- 重心系で見ると、ボールもカップも速度を持ってすれ違う

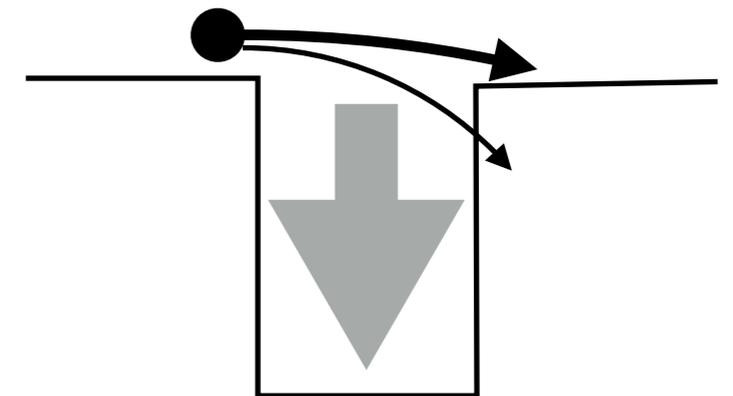


- 非相対論的に大雑把に考えると重心系ではボールの運動量が k 倍になるとカップの運動量も k 倍、すれ違い時間は $1/k^2$ 倍で及ぼす力積も $1/k^2$ 倍

- 質量を無視できると $E \sim p$ なので E^2 (or p^2) に反比例??

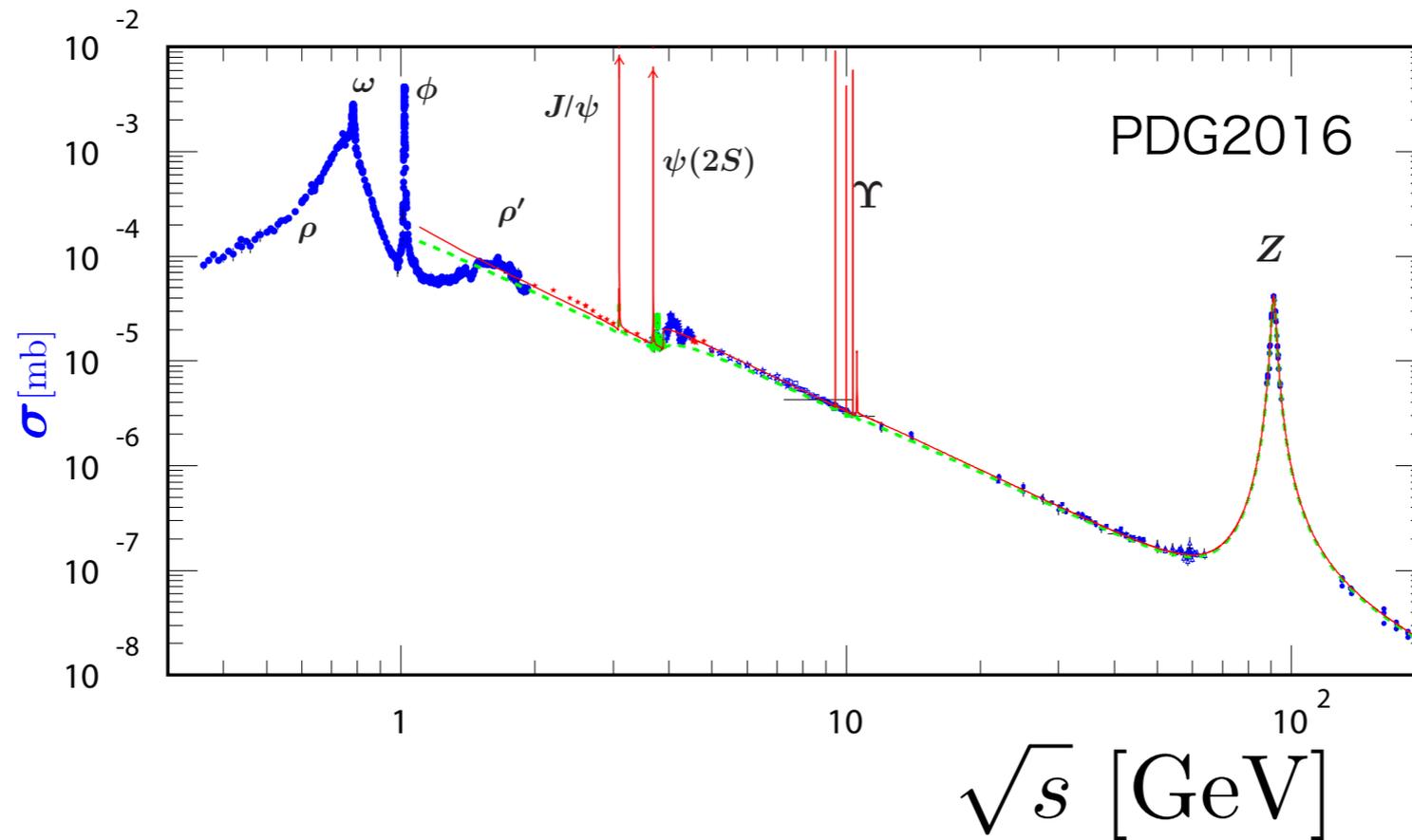


強いと入らない
弱いと入る



速いとカップと反応している
時間が短くなる→落ちない

電子陽電子衝突



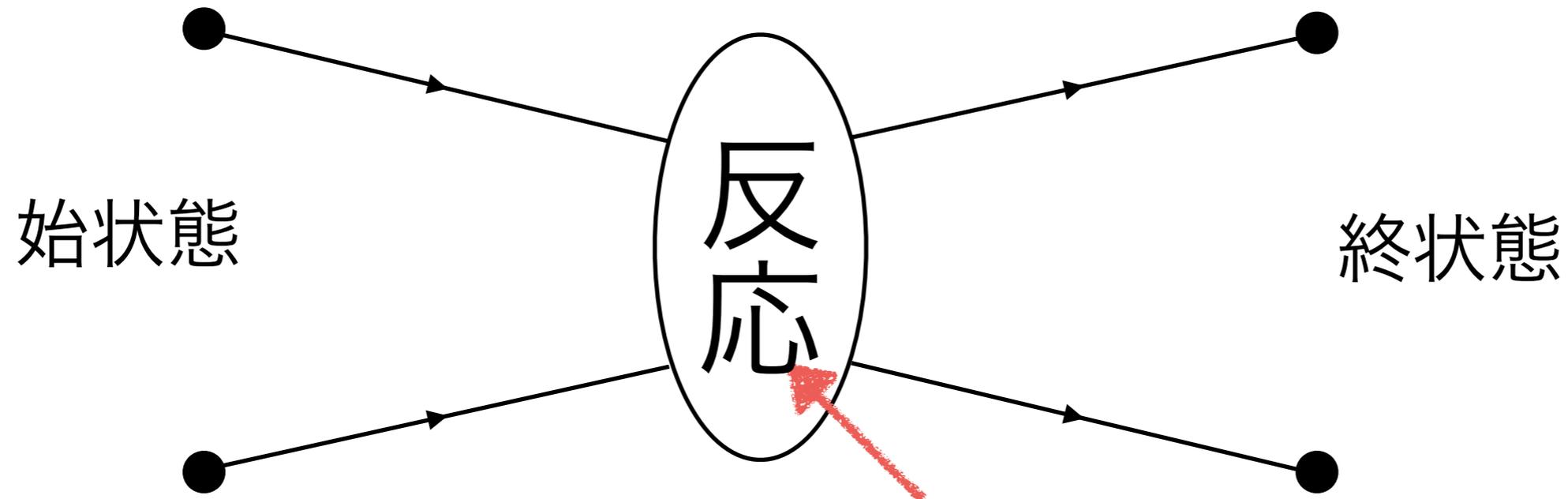
だいたい重心系エネルギーの2乗(s)で
衝突頻度が下がってくる
ところどころスパイクがあるがこれは
今日は無視

まとめ

- ・ 2体系の衝突：
 - ・ 重心系では二つの粒子のエネルギーの足し算
 - ・ 実験室系では入射粒子のエネルギーの平方根
- ・ 衝突のしやすさ（断面積）は重心系エネルギーの2乗に反比例する→エネルギーが高いと衝突しにくい

摂動とファインマン・ ダイアグラム

素粒子の反応を考える



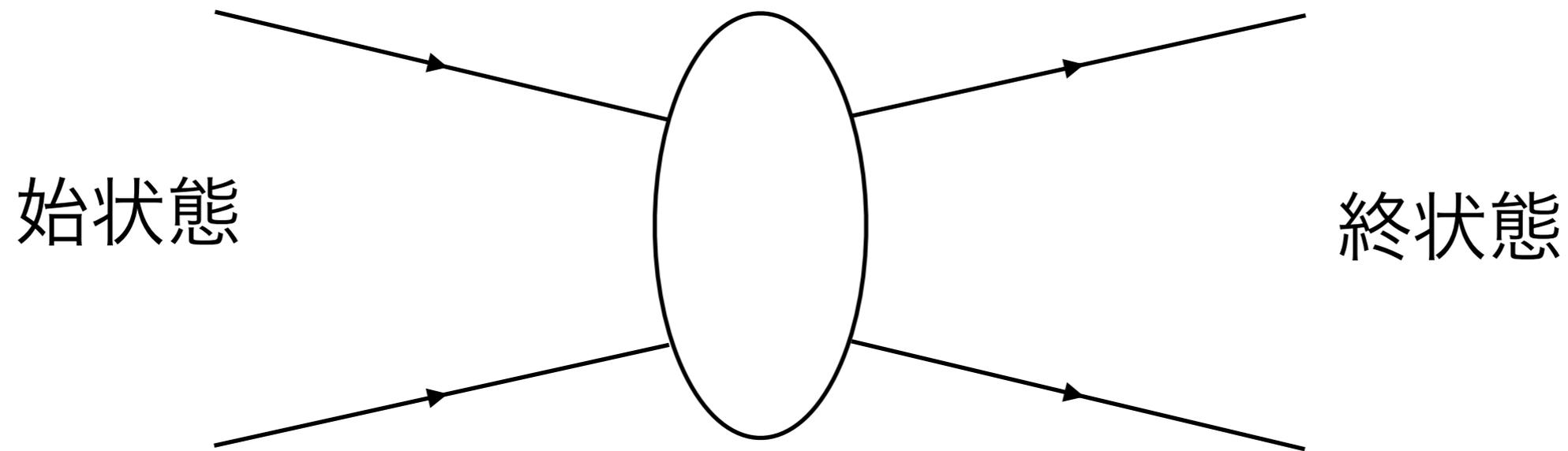
中で何が起きているのか難しい。
 なので、テイラー展開のように
 わかりやすい式の組み合わせにする

$$f(b) = f(a) + \frac{1}{1!} f^{(1)}(a)(b-a)^1 + \frac{1}{2!} f^{(2)}(a)(b-a)^2$$

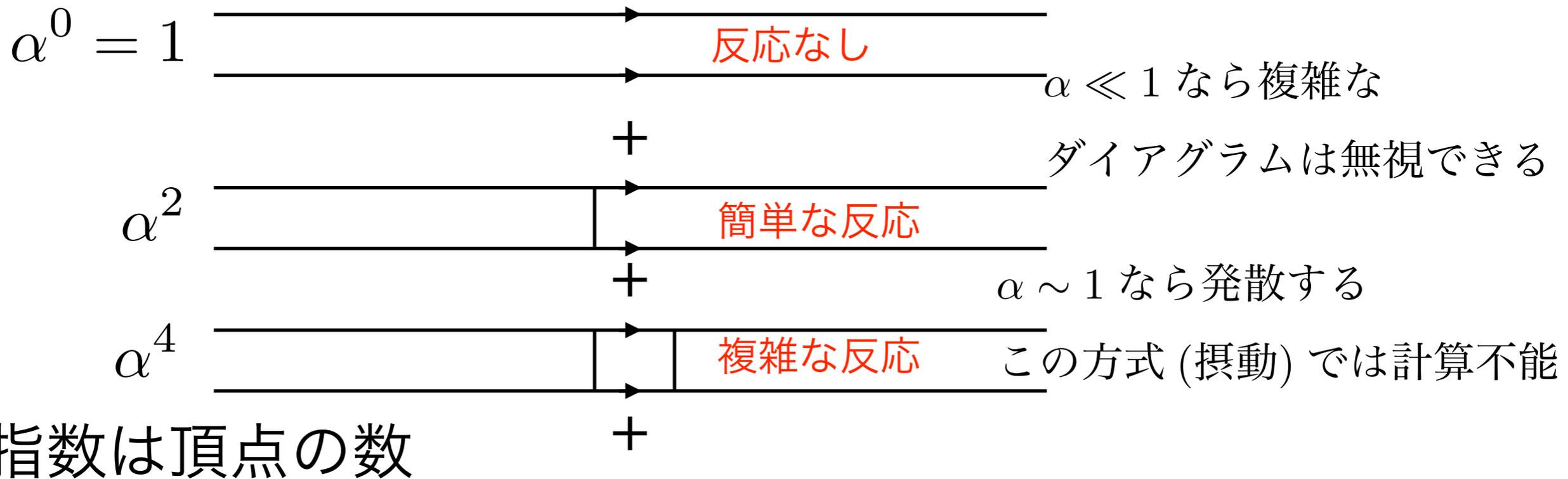
こういうイメージ

$$+ \frac{1}{3!} f^{(3)}(a)(b-a)^3 + \dots$$

素粒子の反応を考える

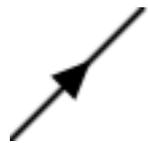


II 下のダイアグラムに分解する



ファインマンダイアグラム

ダイアグラムの部品を組み合わせてダイアグラムを必要とする次数全て作成し、対応する伝播関数を組み合わせて散乱振幅を求めて計算する



フェルミオン



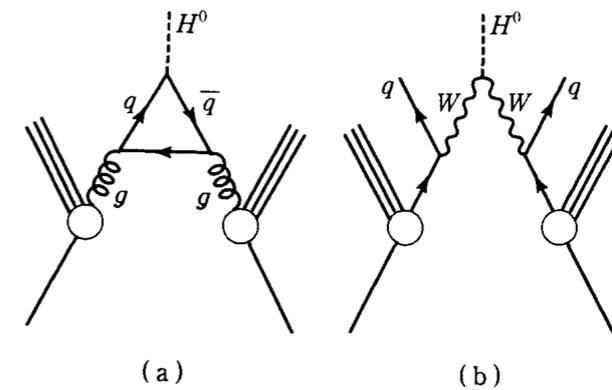
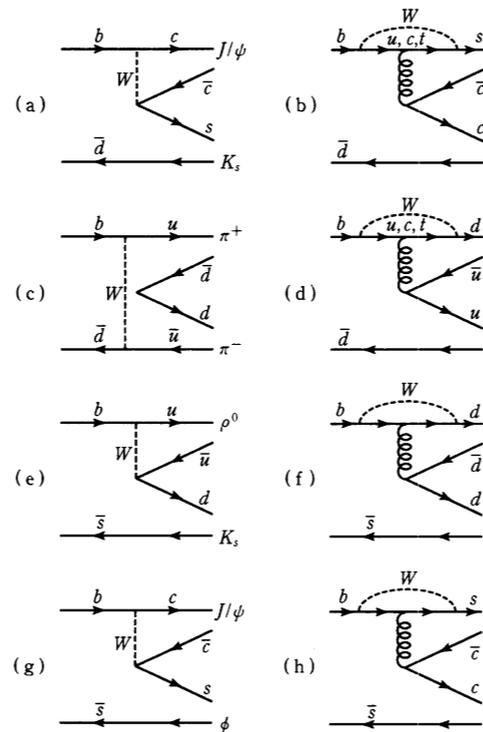
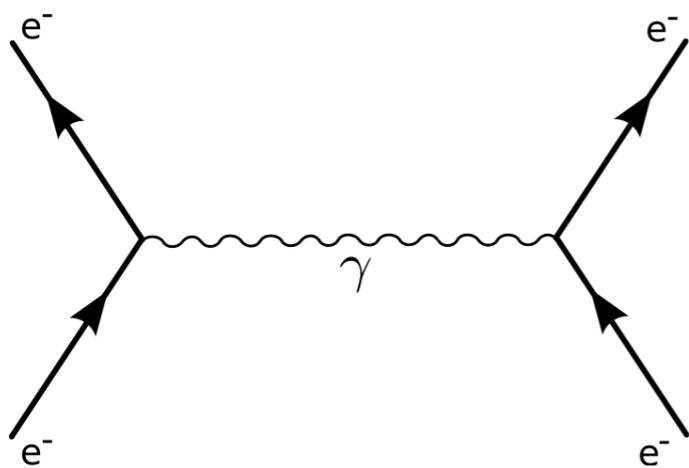
電弱ボソン ($\gamma/W/Z$)



グルーオン



ヒッグス



長島さんの教科書から

ファインマンダイアグラムの メリットと限界

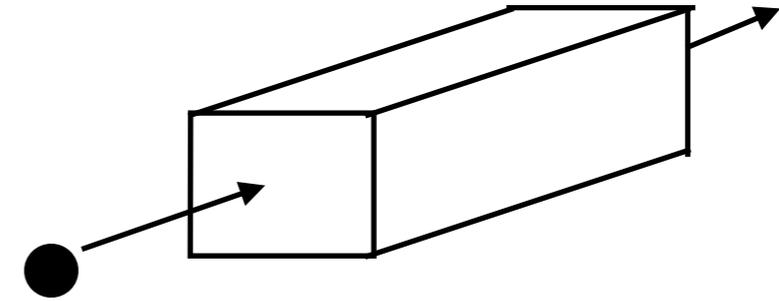
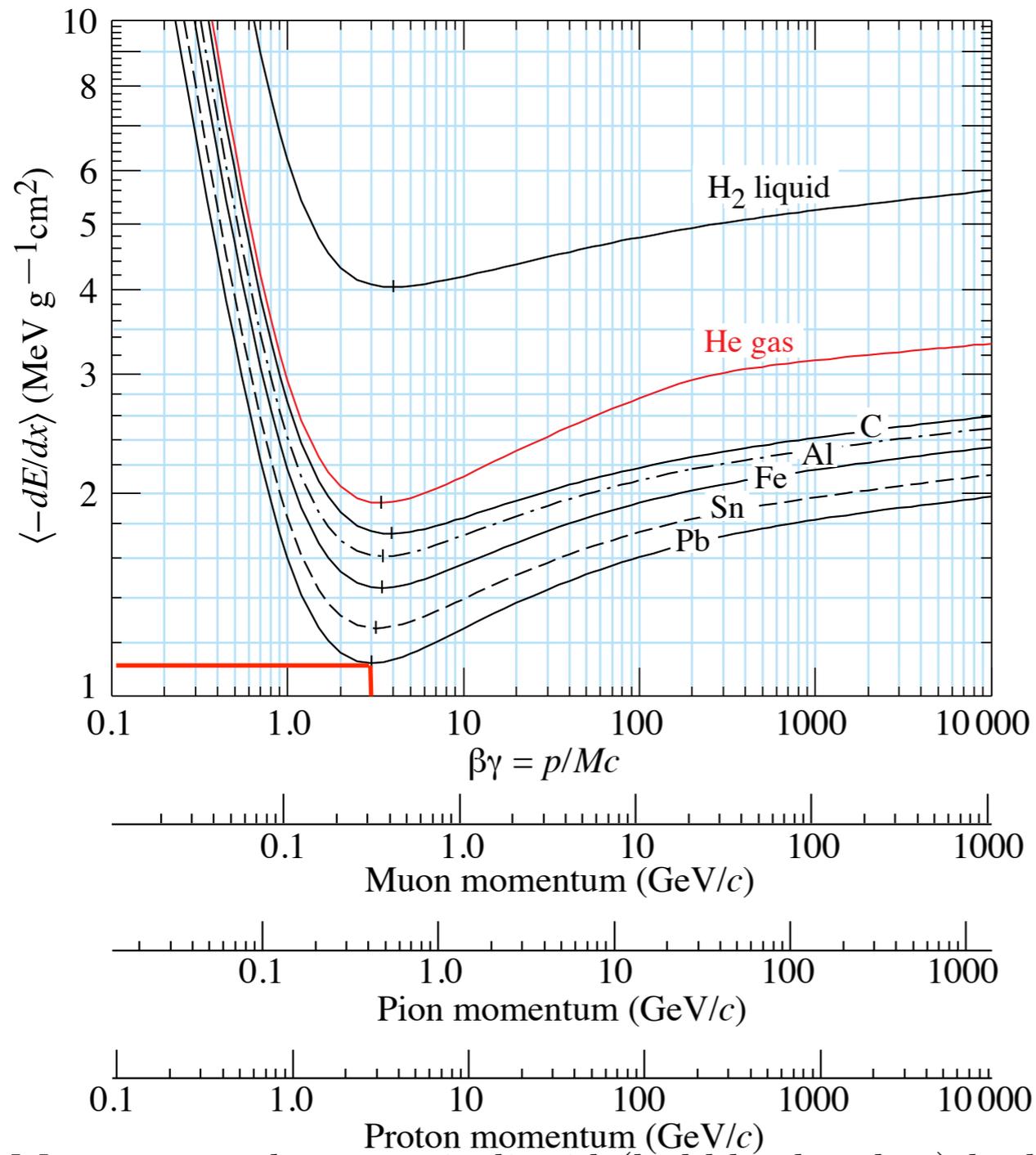
- ・ 絵的に直感的に理解できて計算なしでなんとなくわかる
- ・ 期待している反応の図式だけを切り出せる
- ・ $\alpha \ll 1$ の電磁相互作用、弱い相互作用、「高い運動量移行をもつ強い相互作用」でしか使えない
- ・ はるかに反応量の多いかすっただけ・ハドロンの中のクォーク同士の間にはたらく強い相互作用では使えない
- ・ 別の近似を使う (ChPT, HQET, NRQCD, Latticeなど)

まとめ

- ・ ファインマンダイアグラムだけで素粒子の反応の全てがわかったような気になれる
- ・ クォークが関与する反応（強い相互作用が弱くはたらいっている場合）では結局form factorなど現物合わせが必要になることに気づく（激しくガッカリ）
- ・ ともあれ講義や発表での最強の共通言語

粒子と物質の反応

荷電粒子の最小イオン化損失



粒子が物質で損失するエネルギーは

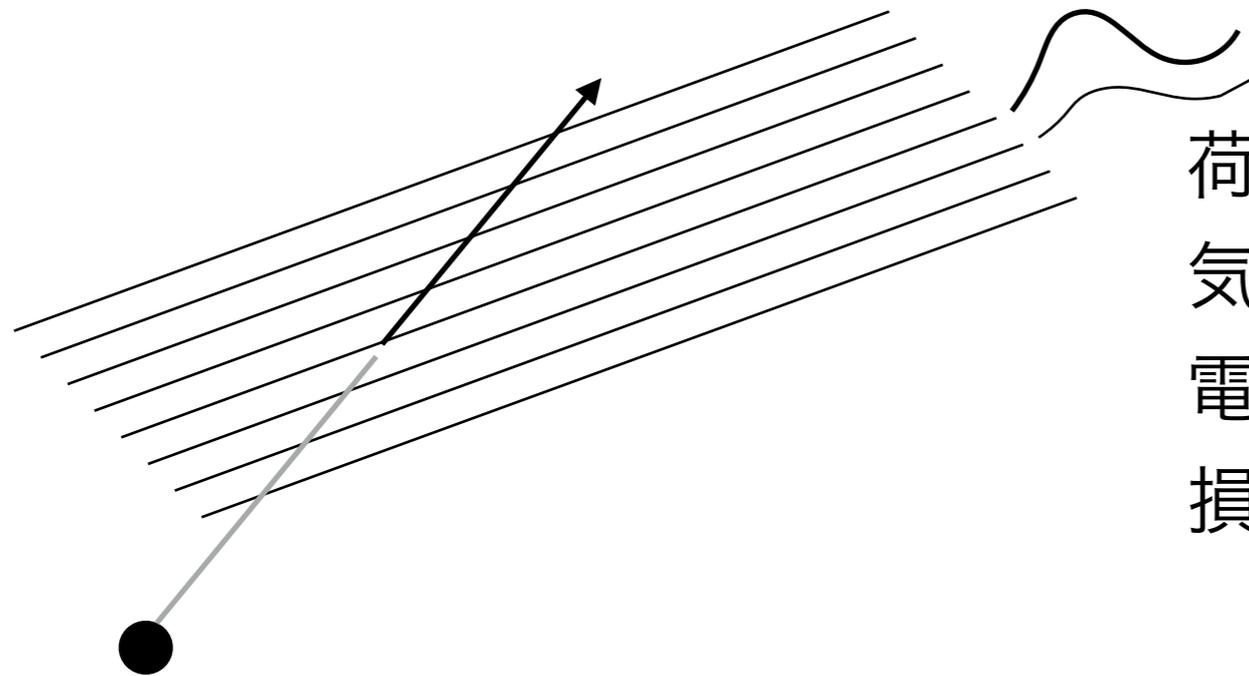
$$\frac{dE}{dx} \propto \text{物質の密度 } g/\text{cm}^3 \times \text{通過距離 cm}$$

$$= g/\text{cm}^2 \text{ に比例}$$

- 高エネルギー物理学実験で興味のある粒子のエネルギーでは、大雑把には最小イオン化損失で仮定してよい

$$\frac{dE}{dx} \sim 1.5 - 2 \text{ MeV/g/cm}^2$$

荷電粒子の軌跡を測定



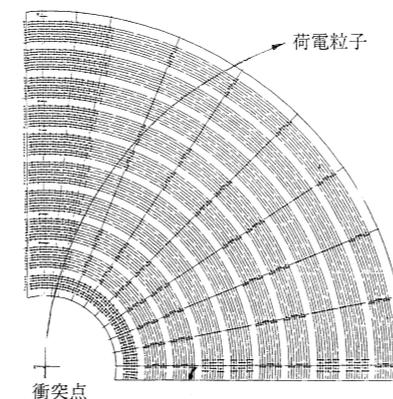
荷電粒子が通過する際に
気体・液体・固体をイオン化し
電気信号などで位置情報や時間情報、
損失エネルギー量を測定する

Ar-CH₄

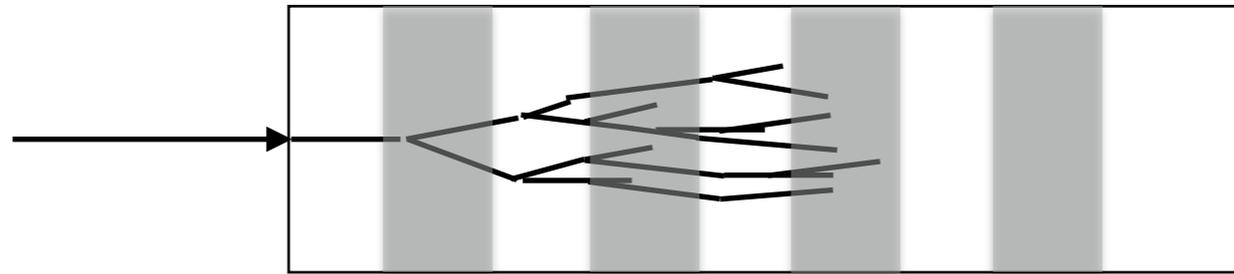
液体Ar

シリコン半導体など

- ・ 多層に構成し磁場をかけると曲率から運動量もわかる
- ・ 損失エネルギー量から粒子の種類もわかる
- ・ 軌跡を複数使って崩壊点を測定することもできる



粒子のエネルギーを測定



物質中で反応を起こさせてシャワーを生成、光などに変えてエネルギー量として読み出す。部分的に反応しやすい物質を入れるサンプリング型もある

電子・光子

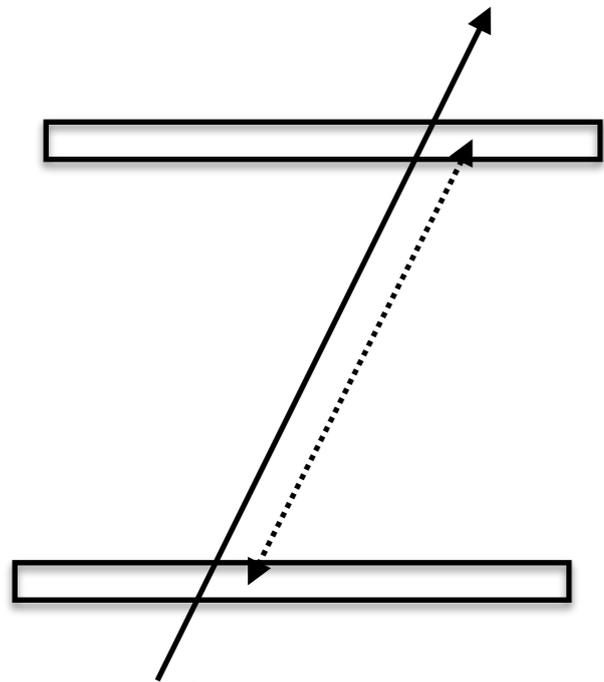
電磁カロリメータ

ハドロン

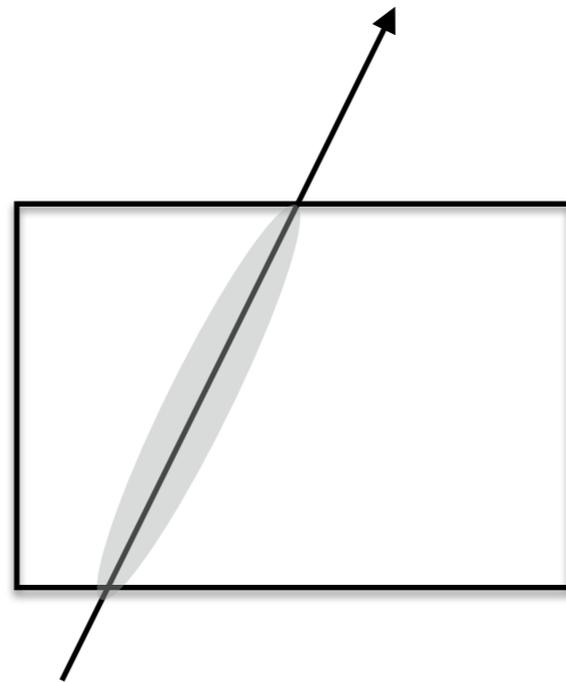
ハドロンカロリメータ

- ・ 粒子のエネルギーに対して必要な長さが対数的にしかならないので、高いエネルギーでの実験に有用

荷電粒子の種類を同定(特にK/ π)



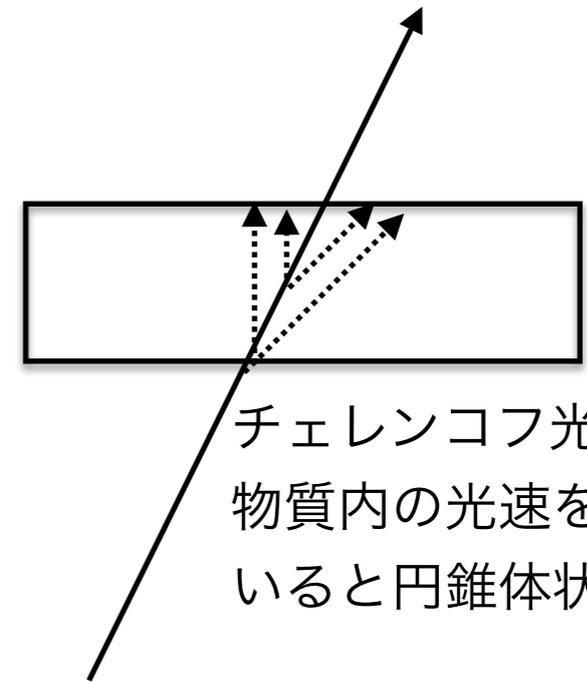
飛んだ時間を測定(TOF)
トリガーカウンターや
反応発生時間を利用



損失エネルギー量を
測定(dE/dx)
軌跡検出器を使う

低運動量

$< 1\text{GeV}/c$



チェレンコフ光は
物質内の光速を越えて
いると円錐体状に出ます

チェレンコフ光を
測定(RICH)

高運動量

まとめ

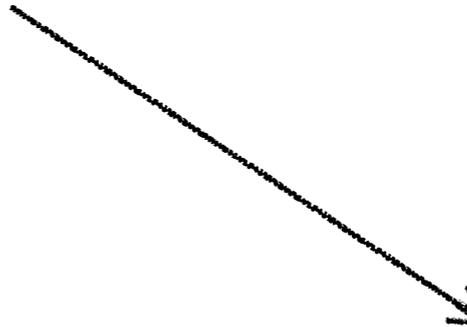
- ・ 軌跡検出器
 - ・ 荷電粒子の通過点を測定、時間や損失エネルギー量、崩壊点も測定できる
- ・ カロリメータ
 - ・ 粒子のエネルギーを測定
- ・ 粒子識別
 - ・ いくつかの検出器を利用して行う、特に K/π の分離

簡単すぎる統計学

平方根と95% Confidence level (CL)

とりあえず平方根

- ・ 不確かさ (uncertainty) は標準偏差
 - ・ 二項分布の統計的不確かさ
 - ・ 決まった数の母集団からいくつか取り出す場合
(くじ引きの当たりが出る確率、世論調査)
 - ・ ポワソン (ランダム) 分布の統計的不確かさ
 - ・ 沢山のデータから低い確率のシグナル N を見つける場合
(宝くじの1等が当たる確率、ヒッグスが見つかる確率)
- ・ 正規分布は期待値と標準偏差が最初に与えられている
- ・ いろいろな2つの分布の引き算の分布は、元の分布とは異なる
(データからバックグラウンドを引いてシグナルを求めるときなど)


$$N \pm \sqrt{N}$$

ないものの探し

- PDGを開いてみると95 % Confidence levelばかり書いてある

H^0 DECAY MODES	Fraction (Γ_i/Γ)	Confidence level	p (MeV/c)
$e^+ e^-$	$< 1.9 \times 10^{-3}$	95%	62545
$J/\psi\gamma$	$< 1.5 \times 10^{-3}$	95%	62507
$\gamma(1S)\gamma$	$< 1.3 \times 10^{-3}$	95%	62187
$\gamma(2S)\gamma$	$< 1.9 \times 10^{-3}$	95%	62143
$\gamma(3S)\gamma$	$< 1.3 \times 10^{-3}$	95%	62116
$\mu\tau$	$< 1.51 \%$	95%	62532
invisible	$< 58 \%$	95%	—

- 超対称粒子やタキオンや...

- ありそうで見つかってない崩壊や...

- 95% CLと書いてあるものは必ず不等号<が書かれている

見つけたいものが見つからなかった 時にどうやって上限を求めるのか？

Table 39.4: Unified confidence intervals $[\mu_1, \mu_2]$ for a the mean of a Poisson variable given n observed events in the absence of background, for confidence levels of 90% and 95%.

実験で

見つけた数 →

n	$1 - \alpha = 90\%$		$1 - \alpha = 95\%$	
	μ_1	μ_2	μ_1	μ_2
0	0.00	2.44	0.00	3.09
1	0.11	4.36	0.05	5.14
2	0.53	5.91	0.36	6.72
3	1.10	7.42	0.82	8.25
4	1.47	8.60	1.37	9.76
5	1.84	9.99	1.84	11.26
6	2.21	11.47	2.21	12.75
7	3.56	12.53	2.58	13.81
8	3.96	13.99	2.94	15.29
9	4.36	15.30	4.36	16.77
10	5.50	16.50	4.75	17.82

これだけ見つかった

← として上限を計算して

95% Confidence levelで

それが存在する確率は

$3.09/1000=0.00309$

$< 0.309\%$ CL=95%

例：1000個調べて

欲しいものが

0個見つかった

大掴みです

まとめ

- ・ ないものの探しで出てくる95%CLは、ポワソン分布（ランダム分布）を仮定した場合のConfidence levelを意味することが多い
- ・ ただし、ポワソン分布じゃないと考えられる場合は当然そこからずれてくる（バックグラウンドを差し引いた時にシグナル数がマイナスになる場合など）

まとめのまとめ

- ・ 理論の人も実験の人もこのくらいのことを大雑把に知っておくと講義や発表の理解が進みます
- ・ KEKのお茶飲み部屋でおじさんたちが議論するときもこの程度のつかみで話をしています
- ・ 厳密には結構おかしかったりするかもしれませんが、感覚的にわかる方が大事です