ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

# I 17 Elementi, il Muone e il suo Magnetismo

Associazione Astronomica del Rubicone

https://www.astrofilirubicone.it/

Domenico Galli

DIFA – Dipartimento di Fisica e Astronomia "Augusto Righi"

San Mauro Pascoli, 26 gennaio 2024

# Traccia

1. Gli Antichi Elementi
2. Il Metodo Scientifico
3. Gli Elementi della Chimica
4. Gli Elementi del Modello Standard
5. Il Muone
6. Il Momento Magnetico

# Gli Elementi

## L'Idea

Fino dai tempi antichi si è pensato che l'**enorme variabilità** della materia conosciuta fosse **riconducibile** a **pochi elementi fondamentali**:

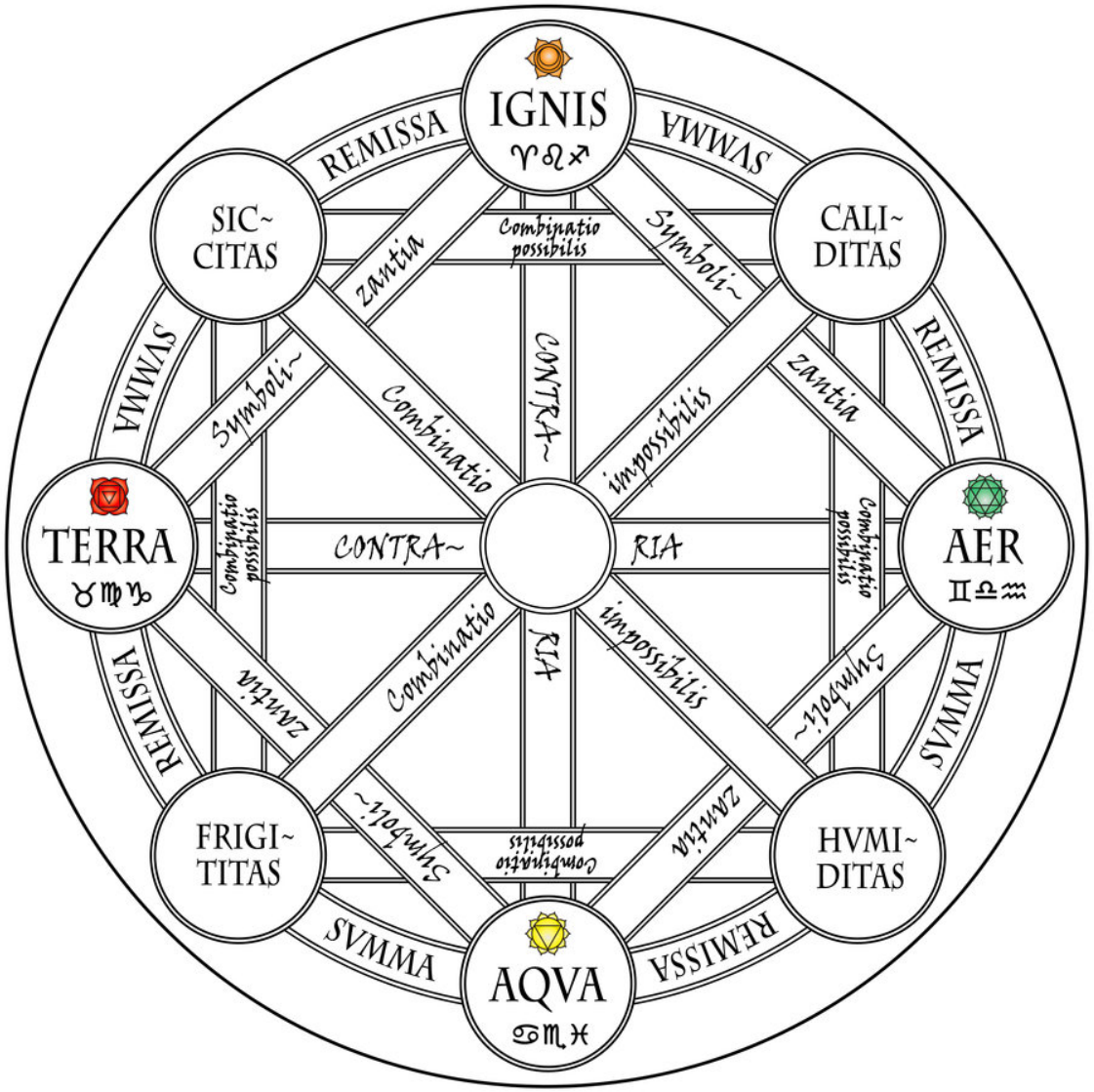
- Il termine **elemento** nasce quindi per designare uno dei **principi costituenti** di tutte le sostanze:
  - Una sostanza semplice di cui sono costituiti i corpi.

# Gli Antichi Elementi

## I 4 Elementi nella Filosofia Greca

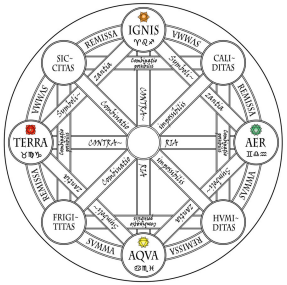
Il filosofo **Empedocle** (V secolo a.C.) ipotizzò che gli elementi fondamentali fossero 4:

- **Terra**,
- **Aria**,
- **Acqua**,
- **Fuoco**.



# Gli Antichi Elementi (II)

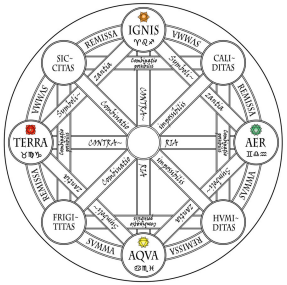
## I 4 Elementi nella Filosofia Greca




- Tali elementi nascevano da un'**osservazione**, per quanto naïf e primitiva;
- Si individuavano **riscontri**, per quanto soltanto **a posteriori**:
  - P. es., in un **ceppo di legno verde** che arde in un camino, si riconosce il **fuoco** nella fiamma, l'**aria** nel fumo, l'**acqua** che ribolle sibilando alle estremità del legno ardente e la **terra** nelle ceneri.
- Si individuano le **proprietà** di tali elementi:
  - P. es., il **fuoco** è caldo e secco, l'**aria** è calda e umida, l'**acqua** è fredda e umida, la **terra** è fredda e secca;
  - Oppure **fuoco** è affilato, sottile e mobile, l'**aria** è smussata, sottile e mobile, l'**acqua** è smussata, densa e mobile, la **terra** è smussata, densa e immobile.
- Ippocrate associa gli elementi ai "**4 umori**" del corpo umano:
  - Bile gialla (**fuoco**), bile nera (**terra**), sangue (**aria**) e catarro (**acqua**).

# Gli Antichi Elementi (III)

## I 4 Elementi nella Filosofia Greca




- Non si prevedeva il risultato di esperimenti prima che essi fossero stati eseguiti:
  - Non era un modello predittivo.
- Si trattava di un'idea priva di fondamento scientifico:
  - Non sottoposta alla prova dei fatti.
- Nessun progresso nella comprensione della natura della materia e delle sue trasformazioni;
- Nessuna applicazione tecnologica o medica efficace.

# Gli Antichi Elementi (IV)

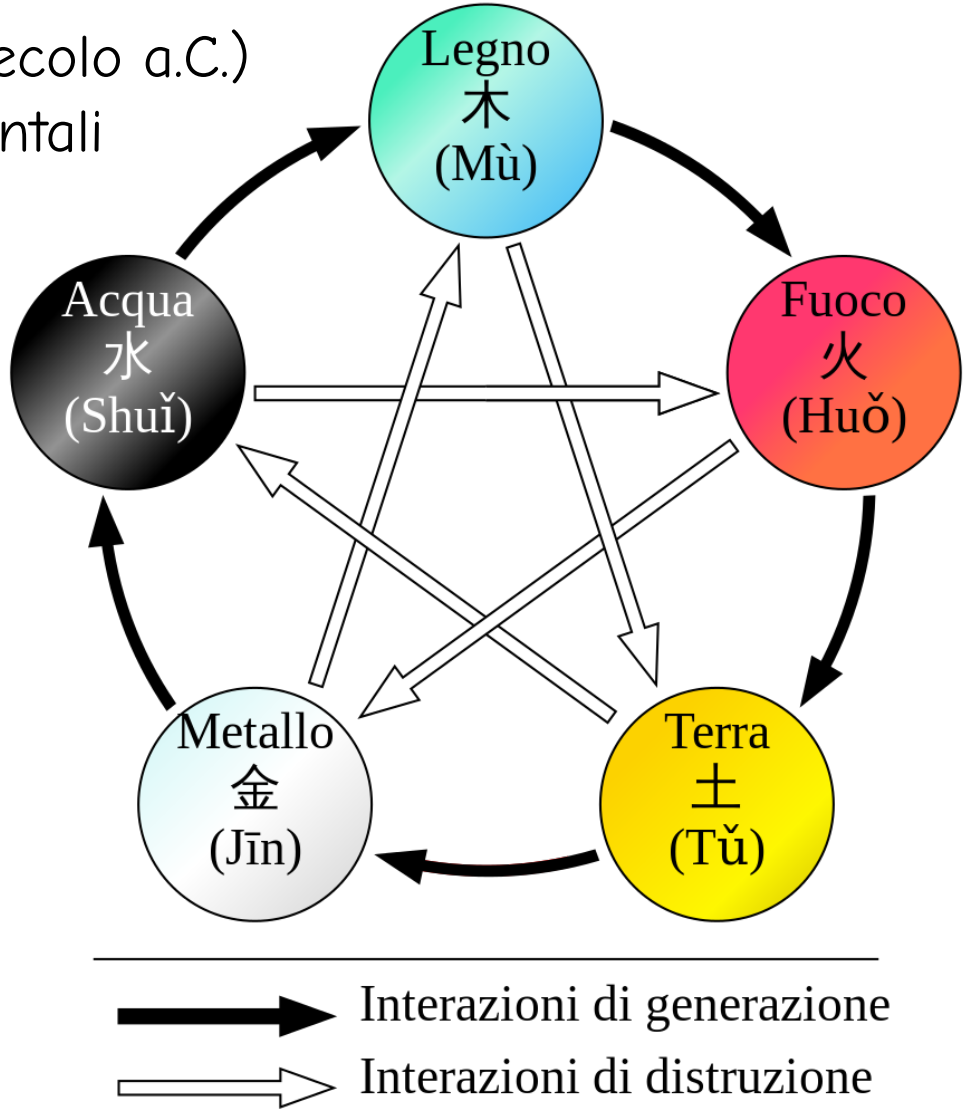
## I 5 Elementi nella Filosofia Cinese

Nella filosofia cinese **wuxing** (VII-IV secolo a.C.) si ipotizzava che gli elementi fondamentali fossero 5:

- **Terra**,
- **Acqua**,
- **Fuoco**.
- **Legno**,
- **Metallo**,

Ma anche questa era un'idea **priva** di **fondamento scientifico**:

- **Non** sottoposta alla **prova dei fatti**.

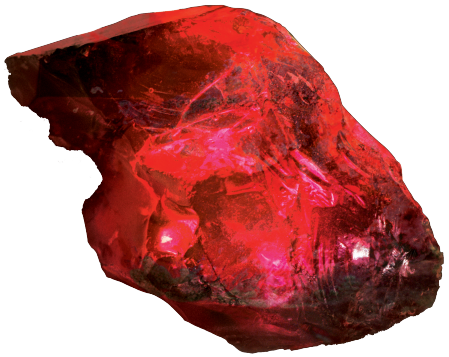


# Gli Antichi Elementi (V)

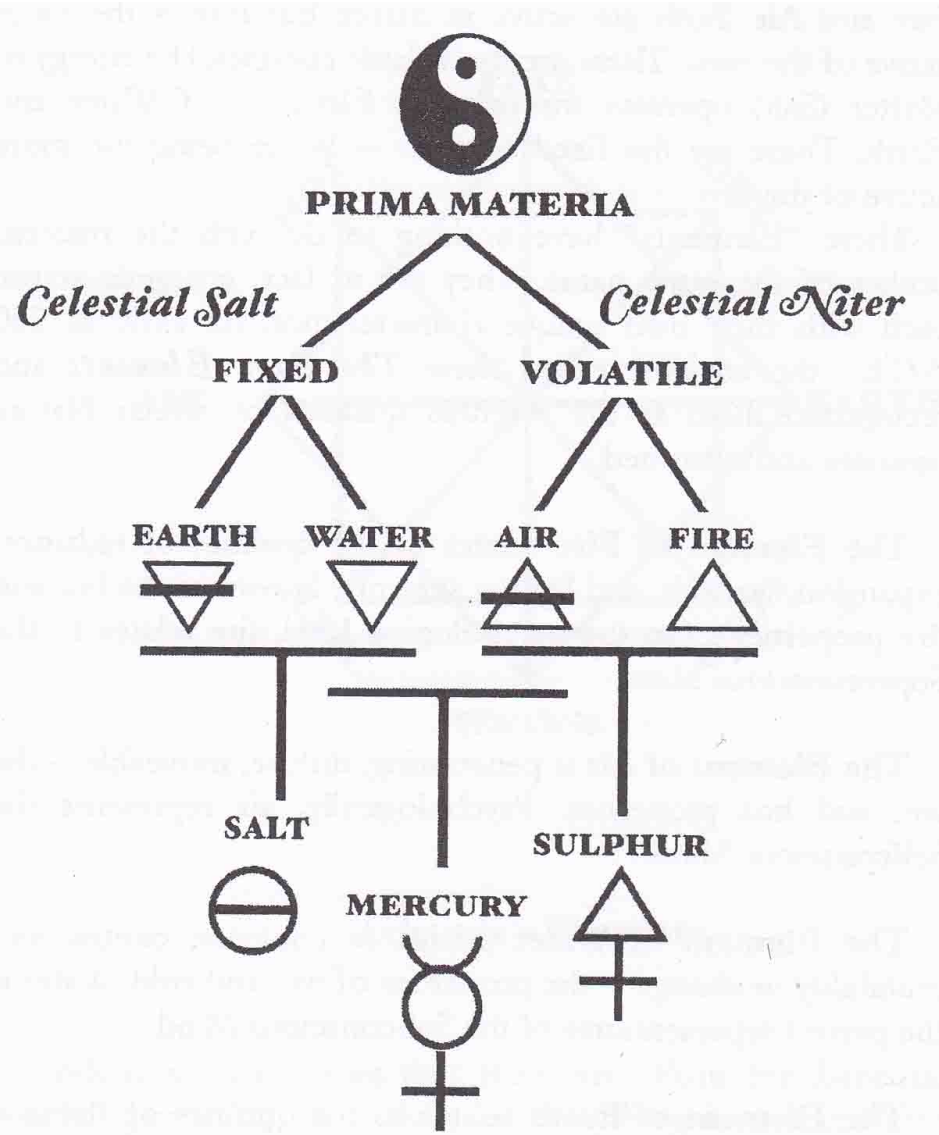
## I 3 Elementi degli Alchimisti

L'alchimista Paracelso (1493–1541), formulò la teoria dei tria prima, secondo la quale i costituenti della materia sarebbero stati 3:

- Zolfo,
- Mercurio,
- Sale.



Pietra filosofale
(dal film Harry Potter)



# Gli Antichi Elementi (VI)

## I 3 Elementi degli Alchimisti

- Le caratteristiche degli elementi erano le seguenti:
  - Zolfo: elemento combustibile;
  - Mercurio: elemento fluido e mutevole;
  - Sale: elemento solido e permanente.
- Bruciando un pezzo di legno, il fuoco era opera dello Zolfo, il fumo era Mercurio e la cenere residua era Sale;
- I tria prima definivano anche l'identità umana:
  - Zolfo: anima (emozioni e desideri);
  - Mercurio: spirito (immaginazione, giudizio morale e le facoltà mentali superiori);
  - Sale: corpo.
- Paracelso riteneva che i princìpi zolfo, mercurio e sale contenessero i veleni che contribuiscono a tutte le malattie;
- Ancora una volta, si trattava di un'idea priva di fondamento scientifico::
  - Non sottoposta alla prova dei fatti.

# Gli Antichi Elementi (VII)

## I 3 Elementi degli Alchimisti

- La pratica dell'alchimia era finalizzata ad alcuni obiettivi (a differenza della scienza che è un'indagine finalizzata innanzitutto alla conoscenza in sé):
  - La **crisopea**, ovvero la **trasmutazione** dei metalli **vili**, per esempio il piombo, in metalli **nobili**, in particolare l'oro, ma anche l'argento (**argiropea**);
  - La creazione di un **elisir di lunga vita** in grado di rendere l'uomo immortale;
  - La creazione di una **panacea universale**, in grado di curare qualsiasi malattia.
- L'idea di creare la **pietra filosofale** è stata variamente collegata a tutti questi progetti.
- L'alchimia **non** riuscì a raggiungere nessuno dei 3 obiettivi, né a creare la **pietra filosofale**.
- L'alchimia **non** portò **alcun progresso** nella comprensione della **natura della materia** e delle sue **trasformazioni**;
- L'alchimia **non** portò **alcuna applicazione tecnologica** o **medica** efficace.

# Gli Antichi Elementi (VIII)

## I 3 Elementi degli Alchimisti

- La **crisopea**, ovvero la **trasmutazione** dei metalli **vili** in metalli **nobili** — certamente **mai** ottenuta dagli **alchimisti** con la **pietra filosofale** — è stata realmente ottenuta dalla **fisica nucleare** molti anni dopo, utilizzando un acceleratore di particelle:
  - Nel 1980, Glenn Theodore Seaborg (1912–1999) è infatti riuscito a trasmutare (mediante **trasmutazione nucleare**) alcune migliaia di atomi di **bismuto** ($^{209}\mathrm{Bi}$) in **oro** ($^{197}\mathrm{Au}$), bomdardandolo con nuclei di carbonio e neon mediante l'acceleratore di particelle Bevalac al Lawrence Berkeley Laboratory;
  - Il **costo** di produzione dell'oro per trasmutazione nucleare risulta tuttavia **molto superiore** al prezzo di mercato dell'oro.

# Il Metodo Scientifico

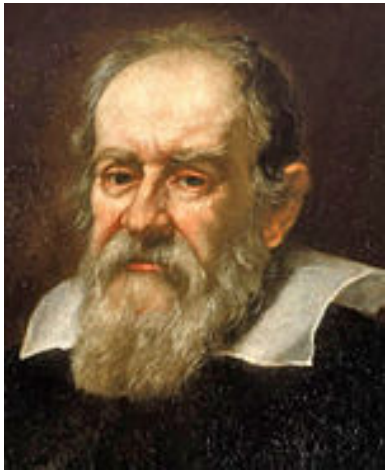
## La Prova dei Fatti

Con Galileo (1564–1642) si afferma nel mondo occidentale il **Metodo Scientifico**, che costituisce un **metodo efficace** per **selezionare le idee** e che consiste, sostanzialmente, nel:

- **Sottoporre** le **idee** alla **prova dei fatti**;
- **Eliminare** le **idee** che **non funzionano**.

**Quello che l'esperienza e il senso ci dimostra si deve anteporre ad ogni discorso, ancorché ne paresse assai ben fondato**
(Galileo Galilei)

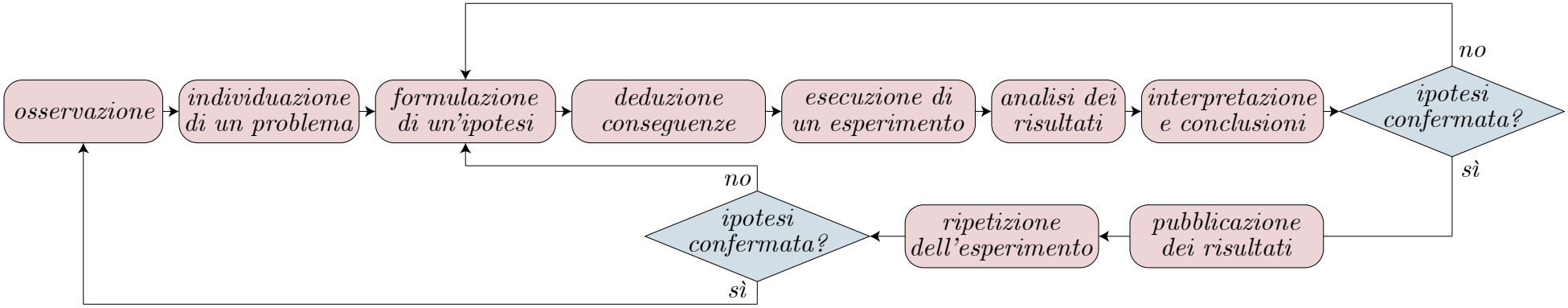
- A.-L. Lavoisier (1743-1794) pose al centro delle sue ricerche l'analisi chimica, **rifiutando** programmaticamente qualunque **sistema di elementi** che **non** risultasse **compatibile con l'esperienza**.
- Per Lavoisier un **elemento** era una sostanza che **non** è possibile **decomporre** mediante l'analisi chimica.



# Il Metodo Scientifico (II)

## Traccia Pragmatica

- Il metodo scientifico consiste nel sottoporre le idee alla **prova dei fatti**;
- Come si **concretizza** tale metodo?
- Il metodo scientifico **non è una semplice ricetta**:
  - Richiede, in ogni sua fase, **intelligenza** e **immaginazione**, **ragionamento** e **creatività**.
- Una **traccia pragmatica** del **metodo scientifico** è illustrata in figura:
  - La descrizione è sicuramente **incompleta**;
  - Molte possono essere le **varianti** allo schema.



# Il Metodo Scientifico (III)

## Le Fasi

- Nella **traccia pragmatica** in figura sono rappresentate le seguenti **fasi**:
  1. **Caratterizzazione** del soggetto di indagine;
  2. Raccolta di informazioni (**osservazione**);
  3. Formulazione di una **ipotesi** esplicativa (**modello**, **teoria**); criterio del **rasoio di Occam** (**lex parsimoniae**);
  4. **Deduzione di conseguenze** dell'ipotesi formulata **diverse dalle osservazioni iniziali** (la scienza deve **prevedere**, non soltanto spiegare a posteriori);
  5. **Progettazione di esperimenti** che possano verificare o smentire l'ipotesi formulata;
  6. **Esecuzione degli esperimenti** e raccolta di dati in maniera riproducibile;
  7. **Analisi** dei dati;
  8. **Interpretazione** dei dati ed elaborazione di una **conclusione** che serva come punto di partenza per nuove ipotesi;
  9. **Pubblicazione** dei risultati;
  10. **Ripetizione della verifica** (spesso eseguita da scienziati diversi).

# Gli Elementi della Chimica

## Le Sostanze Chimiche (Molecole)

La **variabilità** della materia oggi conosciuta è **sterminata**:

- La American Chemical Society ha classificato sinora **204 milioni** di **sostanze** (**molecole** inorganiche e organiche) uniche (al netto dei sinonimi):
  - Si veda CAS registry, `https://www.cas.org/`
- Tale numero aumenta attualmente di **15 000** nuove **sostanze/giorno**.

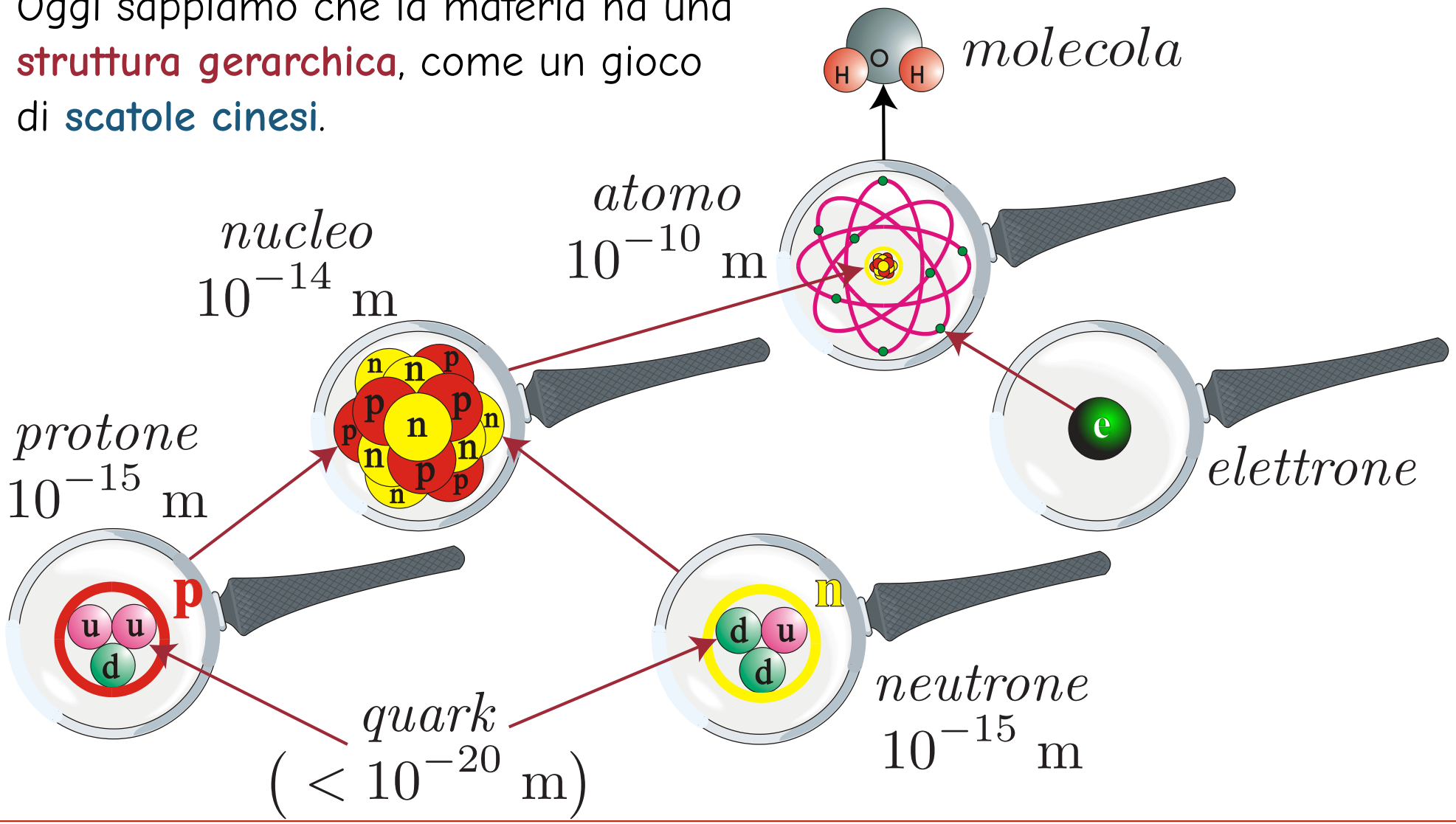
Tuttavia l'avanzamento nella conoscenza della **chimica** e della **fisica atomica**, **nucleare** e **sub-nucleare** ha consentito una nuova ricerca degli **elementi** primi costituenti della materia:

- Questa volta su **base scientifica**.

# Gli Elementi della Chimica (II)

## La Struttura della Materia Ordinaria

Oggi sappiamo che la materia ha una **struttura gerarchica**, come un gioco di **scatole cinesi**.

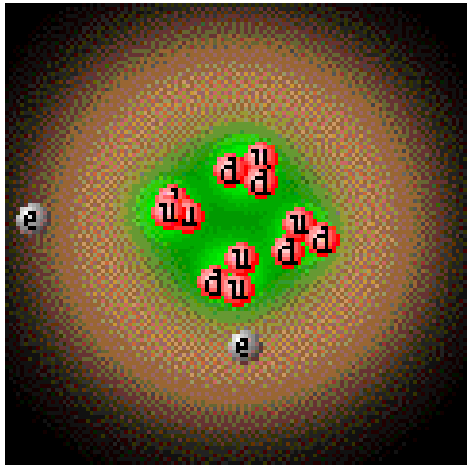


# Gli Elementi della Chimica (III)

## Le Proporzioni dell'Atomo

Se si potesse osservare al microscopio, la struttura atomica della materia apparirebbe come nella figura, che rappresenta un **atomo di elio**.

- Le **proporzioni** però non sono rispettate:
  - Se i **protoni** e i **neutroni** avessero $1\ \mathrm{cm}$ di diametro;
    - **Elettroni** e **quark** avrebbero diametro inferiore a quello di un **capello**;
    - L'**atomo** avrebbe un diametro pari a **30 volte** la lunghezza di un **campo da calcio**.



# Gli Elementi della Chimica (IV)

## Gli Atomi

Tavola Periodica degli Elementi (Dimitri Mendeleev, 1869)

| Group→ / ↓Period | 1 | 2 | 3 | | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 H | | | | | | | | | | | | | | | | | | 2 He |
| 2 | 3 Li | 4 Be | | | | | | | | | | | | 5 B | 6 C | 7 N | 8 O | 9 F | 10 Ne |
| 3 | 11 Na | 12 Mg | | | | | | | | | | | | 13 Al | 14 Si | 15 P | 16 S | 17 Cl | 18 Ar |
| 4 | 19 K | 20 Ca | 21 Sc | | 22 Ti | 23 V | 24 Cr | 25 Mn | 26 Fe | 27 Co | 28 Ni | 29 Cu | 30 Zn | 31 Ga | 32 Ge | 33 As | 34 Se | 35 Br | 36 Kr |
| 5 | 37 Rb | 38 Sr | 39 Y | | 40 Zr | 41 Nb | 42 Mo | 43 Tc | 44 Ru | 45 Rh | 46 Pd | 47 Ag | 48 Cd | 49 In | 50 Sn | 51 Sb | 52 Te | 53 I | 54 Xe |
| 6 | 55 Cs | 56 Ba | 57 La | * | 72 Hf | 73 Ta | 74 W | 75 Re | 76 Os | 77 Ir | 78 Pt | 79 Au | 80 Hg | 81 Tl | 82 Pb | 83 Bi | 84 Po | 85 At | 86 Rn |
| 7 | 87 Fr | 88 Ra | 89 Ac | ** | 104 Rf | 105 Db | 106 Sg | 107 Bh | 108 Hs | 109 Mt | 110 Ds | 111 Rg | 112 Cn | 113 Nh | 114 Fl | 115 Mc | 116 Lv | 117 Ts | 118 Og |
| | | | | * | 58 Ce | 59 Pr | 60 Nd | 61 Pm | 62 Sm | 63 Eu | 64 Gd | 65 Tb | 66 Dy | 67 Ho | 68 Er | 69 Tm | 70 Yb | 71 Lu | |
| | | | | ** | 90 Th | 91 Pa | 92 U | 93 Np | 94 Pu | 95 Am | 96 Cm | 97 Bk | 98 Cf | 99 Es | 100 Fm | 101 Md | 102 No | 103 Lr | |

# Gli Elementi del Modello Standard

## Le Particelle Elementari

Particelle del **Modello Standard** (1970):

- 12 Fermioni:
  - 6 Quark;
  - 6 Leptoni;
- 4 Bosoni di Gauge (forze);
- Bosone di Higgs.

**Materia (Fermioni)**

| | I | II | III | | |
|---|---|---|---|---|---|
| *massa* → | $\approx 2.3$ MeV/c$^2$ | $\approx 1.275$ GeV/c$^2$ | $\approx 173.07$ GeV/c$^2$ | 0 | $\approx 126$ GeV/c$^2$ |
| *carica* → | $\frac{2}{3}$ | $\frac{2}{3}$ | $\frac{2}{3}$ | 0 | 0 |
| *spin* → | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 1 | 0 |
| Quark | u *up* | c *charm* | t *top* | g *gluone* | H *bosone di Higgs* |
| Quark | $\approx 4.8$ MeV/c$^2$, $-\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$, d *down* | $\approx 95$ MeV/c$^2$, $-\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$, s *strange* | $\approx 4.18$ GeV/c$^2$, $-\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$, b *bottom* | 0, 0, 1, $\gamma$ *fotone* | Bosoni di Gauge (Forze) |
| Leptoni | 0.511 MeV/c$^2$, $-1$, $\frac{1}{2}$, e *elettrone* | 105.7 MeV/c$^2$, $-1$, $\frac{1}{2}$, $\mu$ *muone* | 1.777 GeV/c$^2$, $-1$, $\frac{1}{2}$, $\tau$ *tauone* | 91.2 GeV/c$^2$, 0, 1, Z *bosone* Z | Bosoni di Gauge (Forze) |
| Leptoni | $< 2.2$ eV/c$^2$, 0, $\frac{1}{2}$, $\nu_e$ *neutrino elettronico* | $< 0.17$ MeV/c$^2$, 0, $\frac{1}{2}$, $\nu_\mu$ *neutrino muonico* | $< 15.5$ MeV/c$^2$, 0, $\frac{1}{2}$, $\nu_\tau$ *neutrino tauonico* | 80.4 GeV/c$^2$, $\pm 1$, 1, W *bosone* W | Bosoni di Gauge (Forze) |

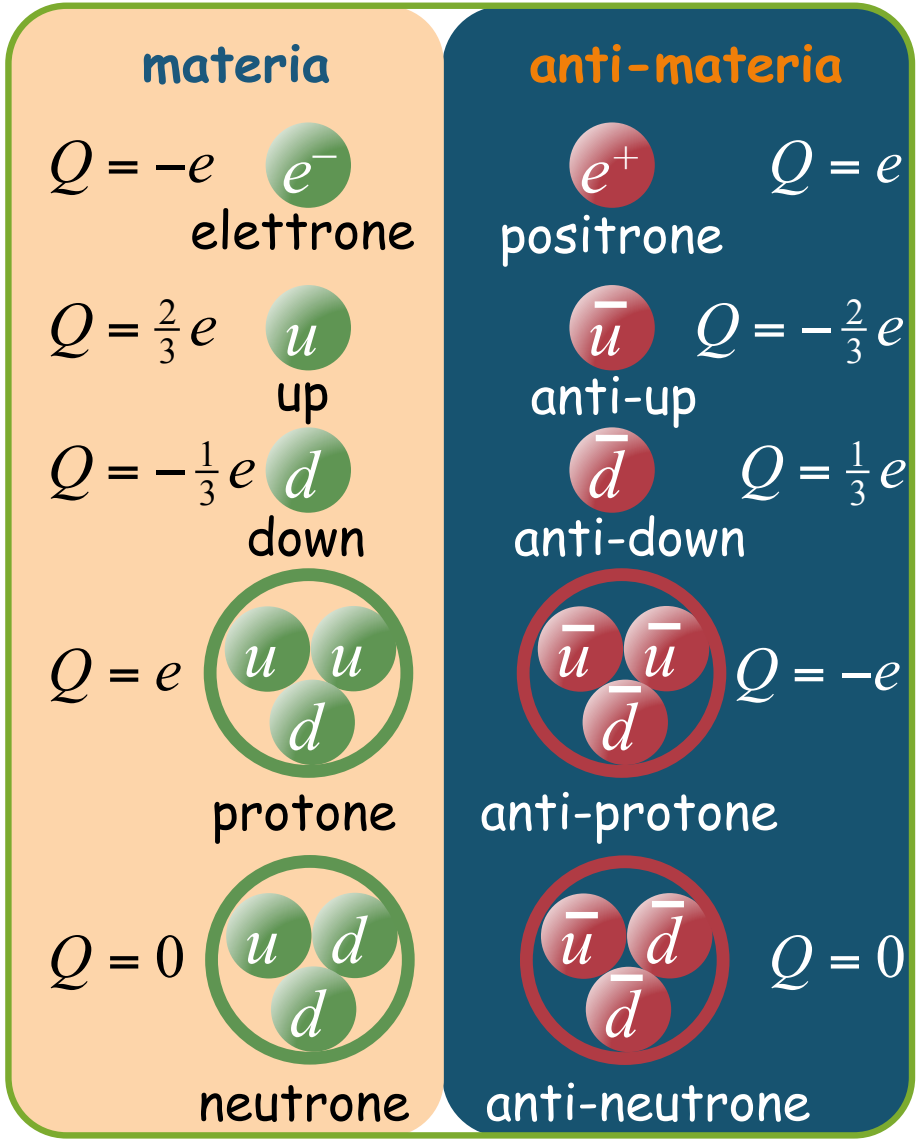
$$1\ \mathrm{e} = 1.602 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}$$
$$1\ \mathrm{MeV/c^2} = 1.783 \times 10^{-30}\ \mathrm{kg}$$

# Gli Elementi del Modello Standard (II)

## Le Antiparticelle

Per ogni particella costituente della materia esiste un'antiparticella costituente dell'antimateria.

- Le antiparticelle sono identiche alle corrispettive particelle in tutto eccetto che nella carica elettrica e nel momento magnetico, che sono opposti.
  - Per esempio, la carica del protone è positiva e quella dell'antiprotone è negativa. Esse hanno la stessa massa.

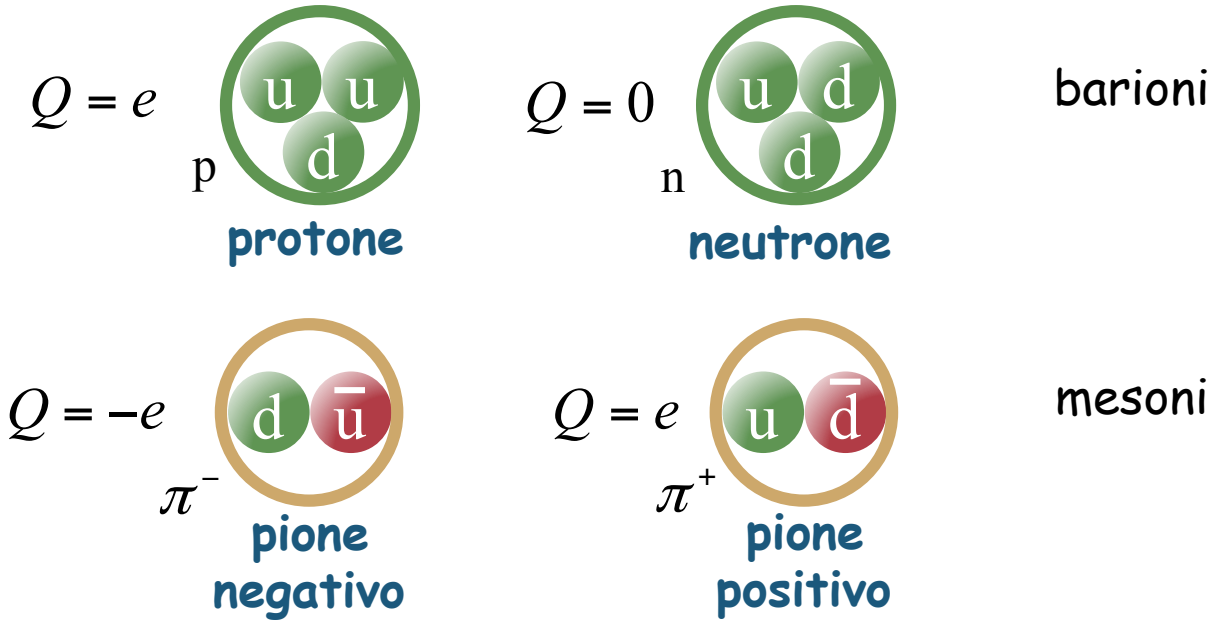


# Gli Elementi del Modello Standard (III)

## Gli Adroni: Barioni e Mesoni

Non si osservano mai i quark individualmente, ma soltanto in combinazione di almeno due o tre (raramente anche 4 o 5).

- Gli adroni sono particelle composite formate da quark. Si suddividono in:
  - Barioni formati da 3 quark.
  - Mesoni, formati da una coppia quark-antiquark.

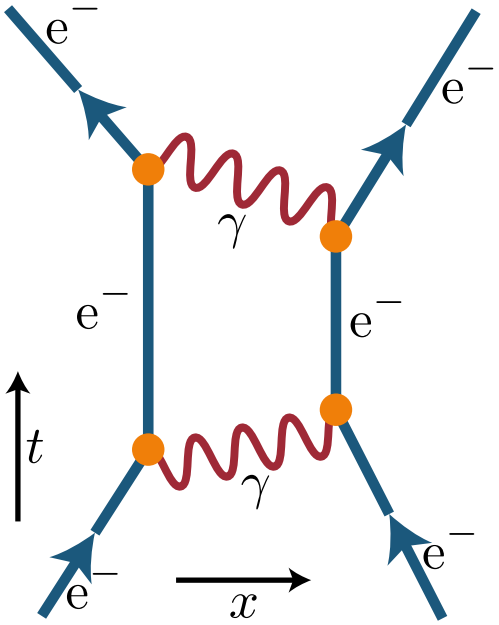


# Gli Elementi del Modello Standard (IV)

## Le Interazioni (Forze)

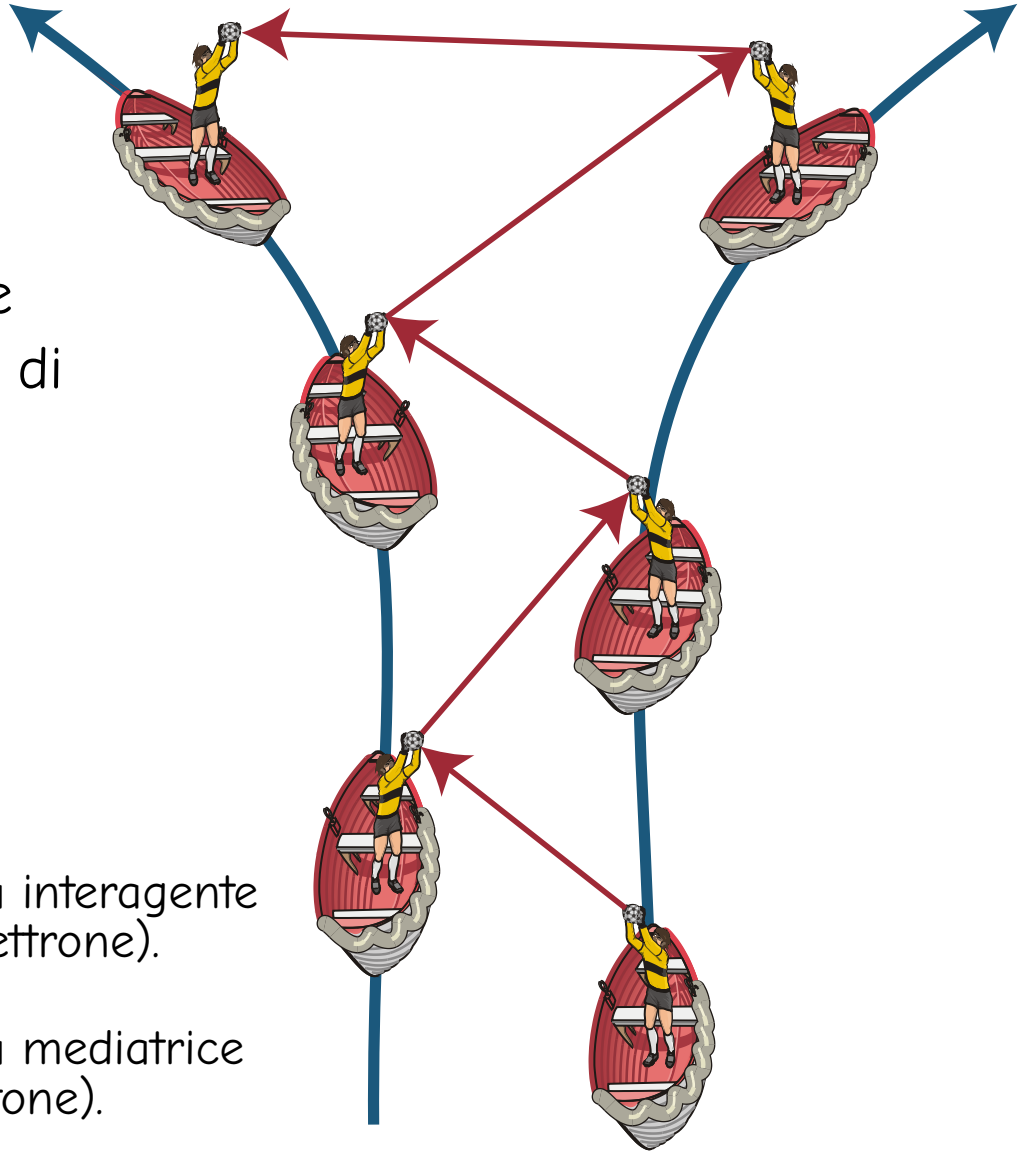
Le **forze fondamentali** sono attribuite allo **scambio** di particelle mediatrici, dette **bosoni**.

- Per esempio la **repulsione** tra due **elettroni** è attribuita allo scambio di particelle mediatrici, dette **fotoni**.



Particella interagente (p. es., elettrone).

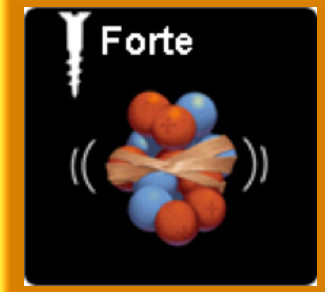
Particella mediatrice (p. es., fotone).



# Gli Elementi del Modello Standard (V)

## Le 4 Forze Fondamentali

In natura esistono soltanto 4 forze fondamentali:

| | | | |  |
|---|---|---|---|---|
| **Particella scambiata** | Gravitone<br>G | Bosoni vettori intermedi<br>$W^+$, $W^-$, $Z^0$ | Fotone<br>$\gamma$ | Gluoni<br>g |
| **Raggio d'azione** | $\infty$ | $10^{-16}$ cm | $\infty$ | $10^{-13}$ cm |
| **Intensità a piccola distanza ($10^{-13}$ cm)** | $10^{-38}$ | $10^{-13}$ | $10^{-2}$ | 1 |

# I Nomi delle Particelle

## Elettrone, Protone, Neutrone

L'etimologia dei **nomi delle particelle**, di solito, risale — o si ispira — al **greco antico**:

- **Elettrone**: da ἤλεκτρον, traslitterato **elektron**, che significa **ambra**:
  - Materiale che si elettrizza se strofinato;
- **Protone**: da πρῶτον, traslitterato **proton**, (neutro singolare di πρῶτος, protos), che significa **primo**, nel senso di primitivo, al primo stadio di sviluppo, all'origine delle altre particelle;
- **Neutrone**: dalla radice latina **neuter** (neutro) e dal suffisso greco "-on", in assonanza con elettrone o protone.

Una evidente eccezione è il nome "**quark**".

- Qual è l'**etimologia** del termine "quark"?

# I Nomi delle Particelle (II)

## Quark

Three **quarks** for Muster Mark!
Sure has not got much of a bark
And sure any he has it's all beside the mark
But O, Wreneagle Almighty, wouldn't un be a sky of a lark
To see that old buzzard whooping about for uns shirt in the dark
And he hunting round for uns speckled trousers around by Palmerstown Park?
Hohohoho, moulty Mark!
You're the rummest old rooster ever flopped out of a Noah's ark
And you think you're cock of the wark.
Fowls, up! Tristy's the spry young spark
That'll tread her and wed her and bed her and red her
Without ever winking the tail of a feather
And that's how that chap's going to make his money and mark!

James Augustine Aloysius **Joyce** (1882–1941),
**Finnegans wake**, 2, 4, 383.

# I Nomi delle Particelle (III)

## Quark

**Finnegans wake**:

- Romanzo scritto in un linguaggio molto particolare, consistente in una **miscela** di:
  - Parole **inglesi**;
  - Parole di **lingue diverse** (compresi ideogrammi);
  - **Parole composte** di parole o morfemi provenienti da **lingue diverse**;
  - **Neologismi** creati mediante **giochi di parole**;
- Con l'idea di ricreare l'esperienza del **sonno** e del **sogno**.
- Si dice sia **in grado di leggere il romanzo soltanto chi l'ha già letto**...

"**Three quarks for Muster Mark...**":

- **Filastrocca** irriverente di 13 versi:
  - Letta, nel romanzo, dal protagonista Humphrey Chimpden Earwicker;
  - Irride Re Marco di Cornovaglia, tradito dalla moglie **Isotta** di Irlanda nella leggenda di **Tristano**.

# I Nomi delle Particelle (IV)

## Quark

Che cosa significa **Quark**?

- La filastrocca si apre ("Three quarks...") con una **formula** simile a quella del brindisi ("Three toasts...") o per un applauso ("Three cheers...").
- Nella circostanza del brindisi quark evoca **quarts** (**3/4 di birra o di vino**: Humphrey Chimpden Earwicker è un oste);
- Quark è anche una parola **tedesca** che significa "**giuncata**" (formaggio fresco fatto con latte cagliato);
- In senso **figurato** in **tedesco** quark significa "**sciocchezza**";
- In **inglese arcaico** "to quark" equivale a "to croak", cioè "**gracchiare**" (onomatopeico):
  - Joyce forse si riferisce ai **3 garriti** dei 4 gabbiani che seguono la nave sulla quale stanno viaggiando Tristano e Isotta e **si prendono gioco** di Re Marco per la relazione di Isotta con Tristano.

Tuttavia il **significato** di "quark" nel romanzo di Joyce **non** è **ben definito**:

- Trattandosi di particelle fino ad allora sconosciute fu scelto il termine "quark" dal premio Nobel **Murray Gell-Mann**, lettore di Joyce.

# Il Muone

## Denominato anche Leptone $\mu$

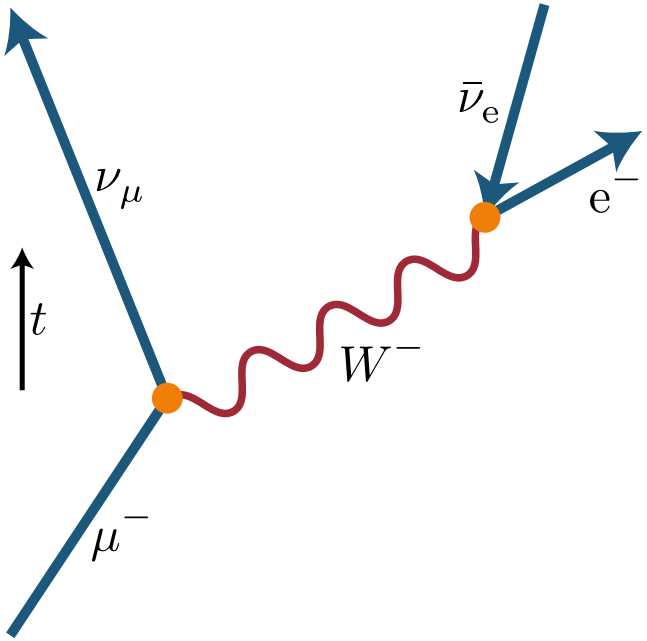
- Il **muone** è una particella **simile all'elettrone**:
  - È un **leptone** elettricamente **carico**;
  - Interagisce con le medesime **forze** con cui interagisce l'elettrone:
    - **Non** interagisce con la **forza nucleare forte**.
  - Ha **carica elettrica** uguale a quella dell'elettrone;
  - Ha **spin** uguale a quello dell'elettrone;
  - Come gli altri leptoni, **non si ritiene** che il muone sia **composto da particelle più semplici**:
    - Cioè, è una particella **elementare**.
- Tuttavia il **muone** ha **massa** pari a $\sim$ **200 volte** la massa dell'elettrone:
  - Si può considerare come un **elettrone pesante**;
  - Esiste un leptone carico ancora più pesante, il **tauone**, con massa pari a $\sim$ **17 volte** la massa del muone.

| | | |
|---|---|---|
| *massa* $\rightarrow$ | $0.511\ \mathrm{MeV/c^2}$ | $105.7\ \mathrm{MeV/c^2}$ |
| *carica* $\rightarrow$ | $-1$ | $-1$ |
| *spin* $\rightarrow$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ |
| | e | $\mu$ |
| | *elettrone* | *muone* |

# Il Muone (II)

## Decadimento

- Il muone è una particella subatomica **instabile**, avente una **vita media** di pari a $2.2\ \mu s$, molto più **lunga** di molte altre particelle subatomiche;
- Il decadimento del muone è **lento** (per gli standard subatomici):
  - Perché il decadimento è mediato soltanto dall'**interazione debole** (piuttosto che dalle più potenti interazione forte o interazione elettromagnetica);
  - Perché la **differenza di massa** tra il **muone** e l'insieme dei suoi **prodotti di decadimento** è piccola, fornendo pochi gradi di libertà cinetica per il decadimento.
- Il **decadimento** del muone produce quasi sempre almeno **3** particelle, che devono includere un elettrone, della stessa carica del muone, un neutrino muonico e un antineutrino elettronico.



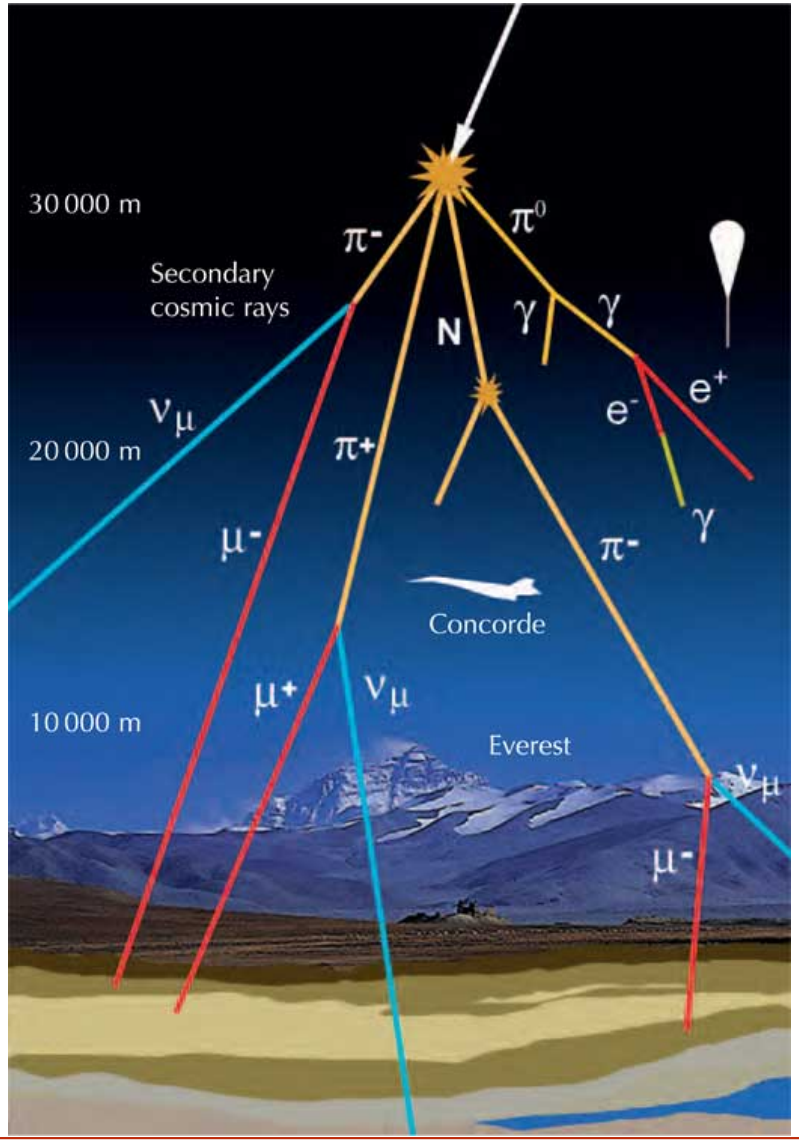
# Il Muone (III)

## Sorgenti: I Raggi Cosmici

- I **muoni** che arrivano sulla superficie terrestre sono creati indirettamente come **prodotti di decadimento** delle collisioni dei **raggi cosmici primari** con le particelle dell'**atmosfera** terrestre.
- La **vita media** dei muoni consentirebbe loro di percorrere distanze pari a $\sim 400$ m:
  - La **dilatazione relativistica del tempo** consente ai muoni di sopravvivere al volo verso la superficie terrestre.
- **Flusso di muoni** sulla **superficie terrestre**:

$$10\,000\ \mathrm{m}^{-2}\,\mathrm{min}^{-1}$$

$$1\ \mathrm{cm}^{-2}\,\mathrm{min}^{-1}$$



# Il Muone (IV)

## I Raggi Cosmici Primari

- I **raggi cosmici primari** sono particelle di alta energia (principalmente **protoni** o **nuclei leggeri**) che si muovono nello spazio a velocità prossima alla velocità della luce.
- I **raggi cosmici primari** provengono dal **Sole**, dall'**esterno del sistema solare nella nostra galassia**, e da **galassie distanti**.
- I dati del telescopio spaziale Fermi (2013) sembrano suggerire che una frazione significativa dei raggi cosmici primari abbia origine dalle esplosioni di **supernovæ**. Sulla base delle osservazioni di neutrini e raggi gamma dal **blazar**[1] TXS 0506+056 nel 2018, anche i **nuclei galattici attivi** sembrano produrre raggi cosmici primari.

[1] **Blazar** significa **blazing quasi-stellar object**, oggetto brillante quasi-stellare. Si tratta di una sorgente cosmica altamente energetica, variabile e molto compatta, con emissione direzionale di jet di materia ionizzata, associata a un buco nero supermassiccio, situata al centro di una galassia che lo ospita.

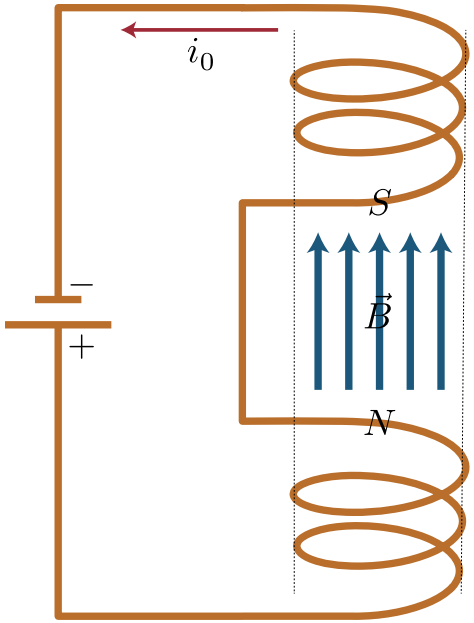
# Il Muone (V)

## I Raggi Cosmici Secondari

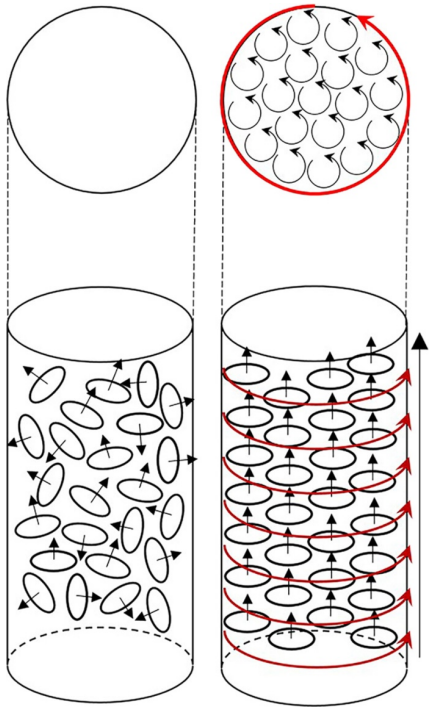
- Nell'**impatto con l'atmosfera terrestre** (principalmente ossigeno e azoto), i raggi cosmici primari producono **sciami di particelle secondarie** (raggi X, protoni, particelle alfa, pioni, muoni, elettroni, neutrini e neutroni), **alcune** delle quali **raggiungono la superficie terrestre**, sebbene la maggior parte venga **deviata nello spazio** dalla magnetosfera o dall'eliosfera.
- Le particelle tipiche prodotte nelle collisioni sono **neutroni** e **mesoni carichi** come **pioni** e **kaoni**. Alcuni di questi decadono in **fotoni**, producendo successivamente cascate elettromagnetiche. Altri successivamente decadono in **muoni** e **neutrini**, che riescono a **raggiungere la superficie della Terra**:
  - Alcuni **muoni ad alta energia** penetrano **attraverso le rocce**, anche per una certa distanza, fino a **miniere** non troppo profonde, prima di attenuarsi a causa dell'assorbimento o della deflessione da parte di altri atomi;
    - Come nel rivelatore Soudan 2, situato nella **miniera** Soudan nel Minnesota, USA, situata a $700\ \mathrm{m}$ di **profondità**.
  - La maggior parte dei **neutrini attraversa la Terra senza ulteriori interazioni**.

# Il Campo Magnetico

## Elettromagnete e Magnete Permanente




- Il campo magnetico $\vec{B}$ è una proprietà che può avere lo spazio di esercitare una forza magnetica $\vec{F}_m$ sulle particelle elettricamente cariche in movimento.
  - Per esempio, lo spazio vuoto in prossimità dei poli di una calamita è "riempito" con un campo magnetico.
- Un campo magnetico $\vec{B}$ è prodotto a sua volta da particelle elettricamente cariche in movimento:
  - Lungo un circuito elettrico in un elettromagnete;
  - Su scala dimensionale microscopica nei magneti permanenti.



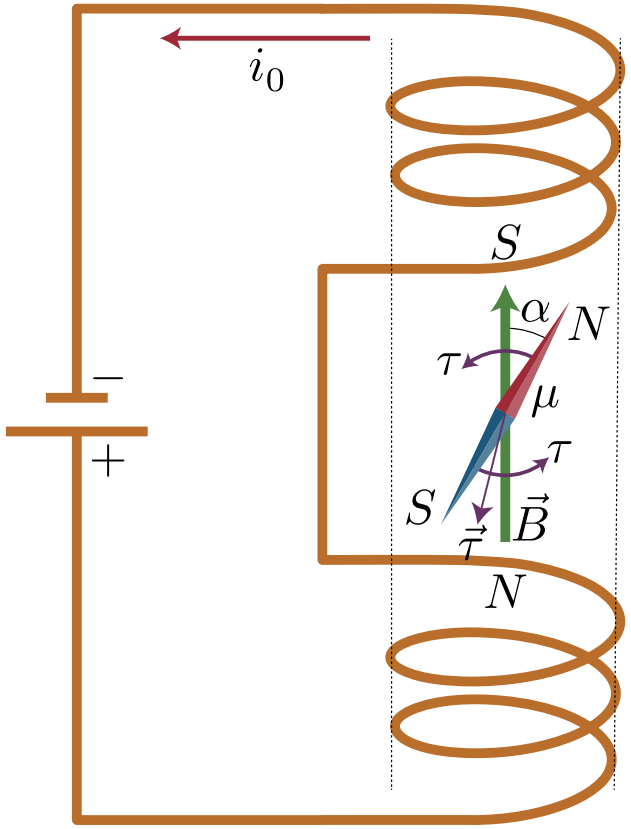
# Il Momento Magnetico

## Ago Magnetizzato

- Il campo magnetico $\vec{B}$ esercita un momento meccanico $\tau$ su un ago magnetizzato:
  - Tende a orientare l'ago nella direzione del campo magnetico;
  - Il momento meccanico $\tau$ è proporzionale al campo magnetico $B$ e al momento magnetico $\mu$ dell'ago:

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \wedge \vec{B}$$

$$\tau = \mu\, B\, \sin\alpha$$



# Il Momento Magnetico (II)

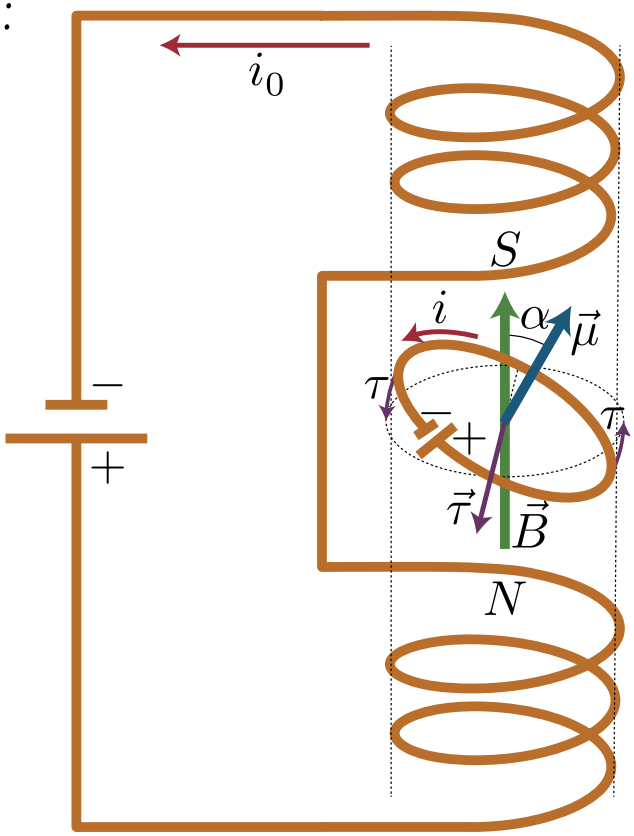
## Spira Percorsa da Corrente Elettrica

- Una **spira** giacente su un piano e **percorsa da una corrente elettrica** di **intensità $i$** si comporta come un **ago magnetico**, di momento magnetico pari a:

$$\vec{\mu} = S\, i\, \hat{n}$$
$$\mu = S\, i$$

(Teorema di equivalenza di Ampère)

dove $S$ è l'area della spira e $\hat{n}$ è la direzione orientata perpendicolare alla spira.



# Il Momento Magnetico (III)

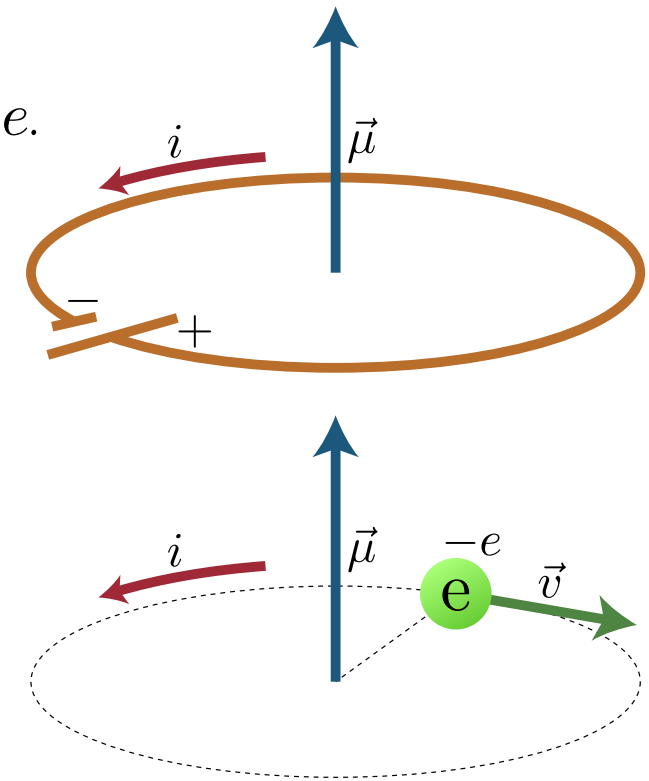
## Elettrone Orbitante

- Un **elettrone** $\mathrm{e}$, di carica elettrica $-e$ che **si muove** lungo una traiettoria circolare con **velocità** $v$ determina, lungo la traiettoria, una **corrente elettrica** $i$.
- Il **tempo** necessario per **compiere un giro** è $T = \frac{2\pi r}{v}$ dove $r$ è il **raggio** della traiettoria e $v$ è la **velocità** dell'elettrone.
- Nel tempo $T$ attraverso un punto qualsiasi della traiettoria passa una quantità di carica pari a $-e$.
- La **corrente elettrica** $i$ lungo la traiettoria dell'elettrone è quindi pari a:

$$i = \frac{-e}{T} = \frac{-e}{\frac{2\pi r}{v}} = -\frac{e\,v}{2\pi\,r}$$

- Il **momento magnetico** $\mu$ dovuto al moto dell'elettrone è quindi pari a:

$$\mu = S\,i = \pi\,r^2\left(-\frac{e\,v}{2\pi\,r}\right) = -\frac{e\,v\,r}{2}$$



# Il Momento Magnetico (IV)

## e il Momento della Quantità di Moto

- Un **elettrone** $\mathrm{e}$, di carica elettrica $-e$ che **si muove** lungo una traiettoria circolare con **velocità** $v$ possiede anche un **momento della quantità di moto** $L$, che è una grandezza meccanica definita come:

$$\vec{L} = \vec{r} \wedge (m_\mathrm{e}\, \vec{v})$$

$$L = m_\mathrm{e}\, v\, r$$

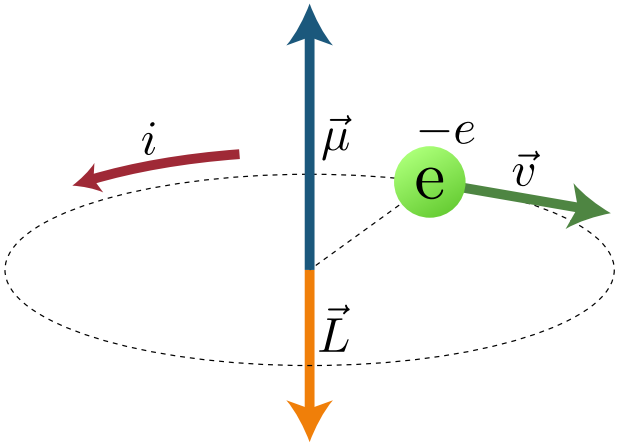
dove $m_\mathrm{e}$ è la **massa** dell'elettrone.

- Si può scrivere pertanto:

$$\mu = -\frac{e\, v\, r}{2} = -\frac{e}{2m_\mathrm{e}}\,(m_\mathrm{e}\, v\, r) = -\frac{e}{2m_\mathrm{e}}\, L$$

- Si definisce **rapporto giromagnetico** o **rapporto magnetomeccanico** il rapporto:

$$\gamma = \frac{\mu}{L} = \frac{-e}{2m_\mathrm{e}}$$



# Il Momento Magnetico (V)

## Rapporto Giromagnetico $\gamma$ e Fattore $g$

- Il rapporto giromagnetico $\gamma$ si misura in $\mathrm{C/kg}$ o in $\mathrm{rad\,s^{-1}\,T^{-1}}$.
- Si può definire una grandezza $g$ dello stesso tipo, ma **adimensionale** (senza unità di misura) denominata **fattore $g$**:

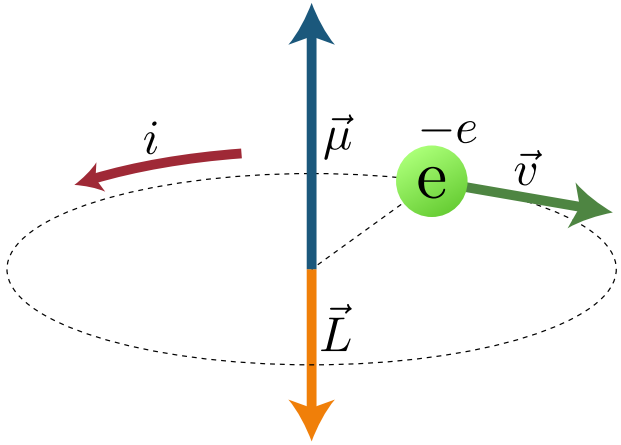
$$g = \frac{2m_\mathrm{e}}{e}\,\gamma = \frac{2m_\mathrm{e}}{e}\,\frac{\mu}{L}$$

- Per l'elettrone che orbita risulta:

$$g = \frac{2m_\mathrm{e}}{e}\,\frac{-e}{2m_\mathrm{e}} = -1$$

- Quindi possiamo scrivere:

$$\frac{\mu}{L} = \gamma = \frac{e}{2m_\mathrm{e}}\,g \qquad , \qquad g = -1$$
$$\mu = \gamma\,L = \frac{e}{2m_\mathrm{e}}\,g\,L$$

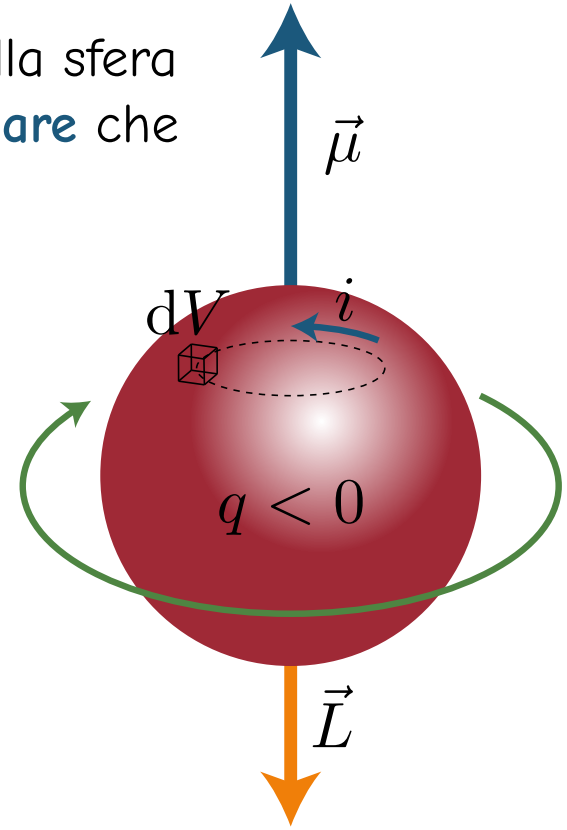



[1]

# Sfera Elettrizzata Carica in Rotazione

## Spin

- Anche una **sfera isolante elettrizzata** di raggio $R \neq 0$ e carica elettrica $q \neq 0$ in **rotazione su se stessa** attorno a un asse possiede un **momento della quantità di moto** $\vec{S}$ (denominato **spin**) e un momento magnetico $\vec{\mu}_S$ (denominato **momento magnetico di spin**):
  - La carica elettrica di una qualunque **porzione** $\mathrm{d}V$ della sfera che non sono sull'asse di rotazione ha un **moto circolare** che determina una **corrente elettrica** $i$.
- Tuttavia la relazione tra $\vec{S}$ e $\vec{\mu}_S$ **dipende** dalla **distribuzione** della densità di carica elettrica e della densità di massa della sfera.
- Se il **raggio** della sfera è **nullo** ($R = 0$), come accade per le particelle elementari, come elettrone o muone, la **meccanica classica** prevede che $\vec{S} = 0$ e $\vec{\mu}_S = \vec{0}$.



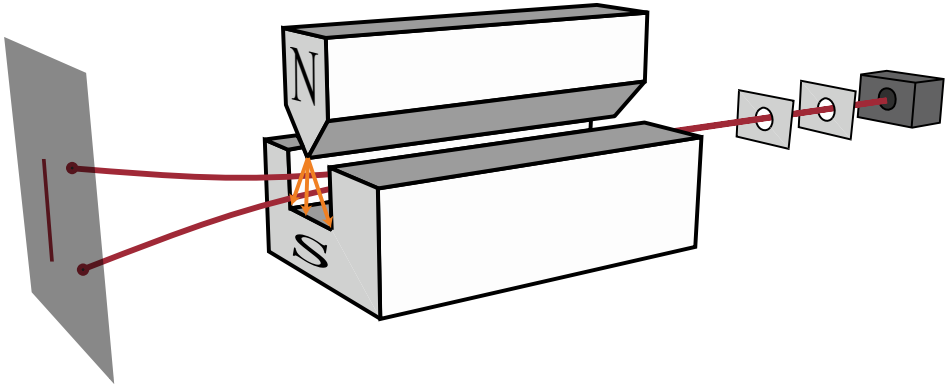
# Esperimento di Stern e Gerlach (1922)

## Lo Spin dell'Elettrone

- L'esperimento di Stern e Gerlach (1922) mostra che gli elettroni possiedono un momento magnetico di spin $\vec{\mu}_S$.
- Un fascio di elettroni attraversa un campo magnetico $\vec{B}$ non uniforme:
  - Gli elettroni sono soggetti a una forza verticale che dipende dal loro momento magnetico di spin $\vec{\mu}_S$.
- Gli elettroni si concentrano su due punti distinti dello schermo:
  - Non su una linea, come avverrebbe se — seguendo la meccanica classica — gli elettroni potessero avere qualunque valore di $\vec{\mu}_S$.
- Gli elettroni, pur essendo puntiformi ($R = 0$), possiedono spin.
- Gli elettroni possono avere soltanto due valori possibili di spin:

$$S_z = \pm\frac{\hbar}{2}$$

$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 6.582119569 \cdot 10^{-16}\ \mathrm{eV} \cdot \mathrm{s}$
è la costante di Planck ridotta.

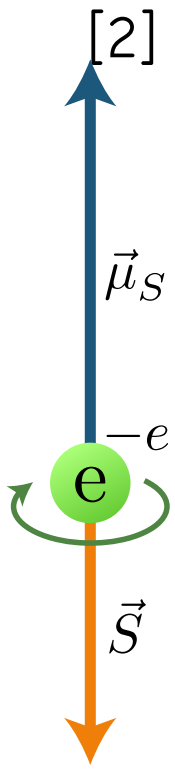


# Spin di un Elettrone

- Nel caso dello **spin di un elettrone** risulta, **diversamente** dalla relazione [1] (diap. 38):

$$\frac{\mu_S}{S} = \gamma_{\rm e} = \frac{e}{2m_{\rm e}}\, g_{\rm e} \qquad , \qquad g_{\rm e} = -2.00231930436256$$
$$\mu_S = \gamma_{\rm e}\, S = \frac{e}{2m_{\rm e}}\, g_{\rm e}\, S$$

- Il **fattore $g$** per lo spin dell'elettrone è diverso dal **fattore $g$** per l'elettrone orbitante, si veda [1] (diap. 38).



# Il Fattore $g_{\mathrm{e}}$ di un Elettrone

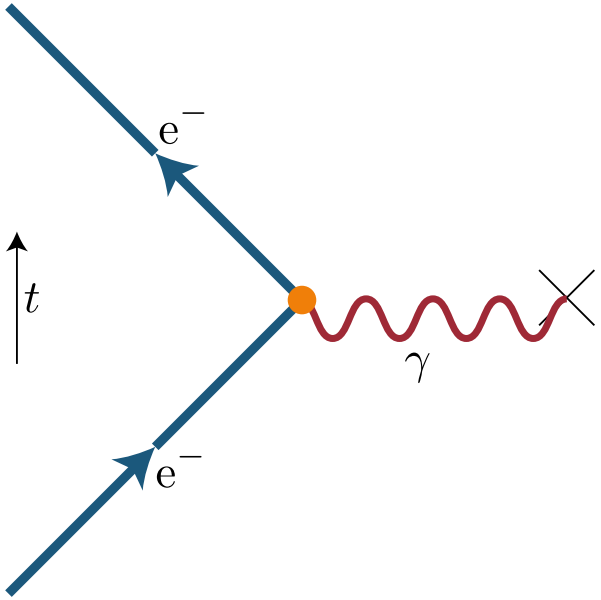
## Diagramma di Feynman ad Albero

- Il **fattore $g_{\mathrm{e}}$** di un elettrone può essere **calcolato** mediante l'**elettrodinamica quantistica** (**QED**).
- Nella **QED** l'interazione **più semplice** del momento magnetico $\vec{\mu}$ dell'elettrone con il campo magnetico $\vec{B}$ può essere descritto come uno **scambio di un fotone**, come in figura.
- Paul Adrien Maurice Dirac (1902–1984) calcolò, nel 1920:

$$g_{\mathrm{e}} = -2$$

Il calcolo si riferisce al **diagramma di Feynman** in figura.

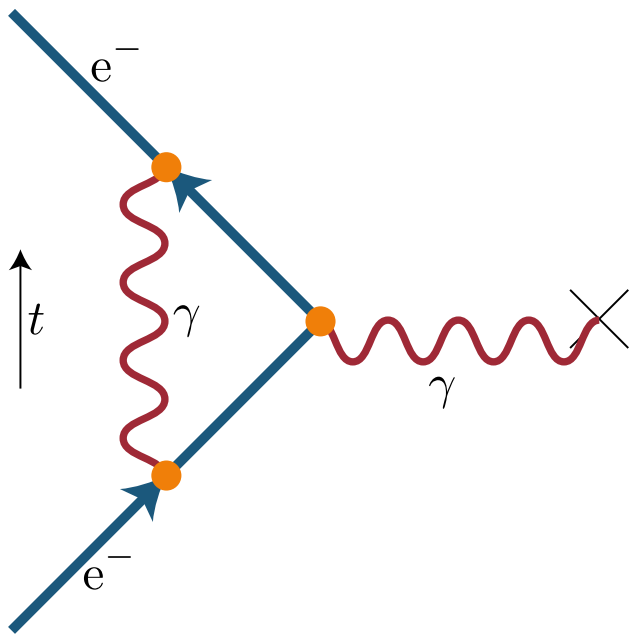
- Tuttavia il processo di assorbimento o emissione di un fotone è il processo **più semplice** (e più importante) di interazione $\vec{\mu}$-$\vec{B}$, ma **non è l'unico**:
  - Altri processi sono possibili. Le ampiezze dei diversi processi devono essere sommate e il risultato della somma deve essere elevato al quadrato.



# Il Fattore $g_e$ di un Elettrone (II)

## Diagramma di Feynman con 1 Circuito

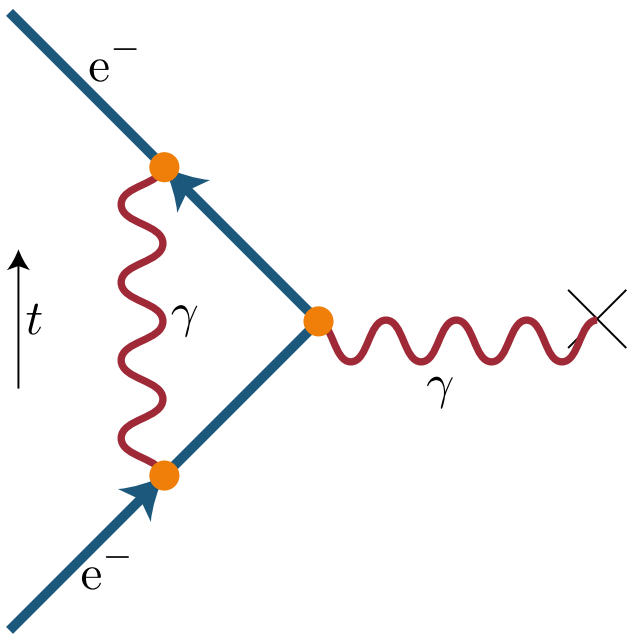
- L'elettrone può **emettere** un fotone prima di avere interagito con il campo magnetico $\vec{B}$ e poi **riassorbirlo** dopo avere interagito con il campo, come illustrato in figura.
- Tale fotone è denominato **fotone virtuale**, perché non può mai essere rilevato direttamente, anche se i suoi effetti su $g$ sono reali e misurabili.
- L'**aggiunta** di un **fotone virtuale** al **diagramma di Feynman** potrebbe apparire semplice: esso forma un **circuito** (**loop**), allontanandosi, poi ricongiungendosi al percorso dell'elettrone.



# Il Fattore $g_e$ di un Elettrone (III)

## Diagramma di Feynman con 1 Circuito

- Calcolare l'effetto del fotone virtuale sul fattore $g_e$ è più difficile:
  - Il fotone virtuale può avere energia illimitata;
  - Per un calcolo accurato, è necessario sommare le ampiezze associate a ogni possibile energia e — senza un limite superiore — la somma risulta infinita;
  - Questi risultati infiniti non plausibili per due decenni hanno ostacolato l'ulteriore sviluppo della QED.
- La soluzione fu una tecnica di calcolo, denominata rinormalizzazione, elaborata da Richard Feynman, Julian Schwinger, Shin'ichirō Tomonaga e Freeman Dyson.



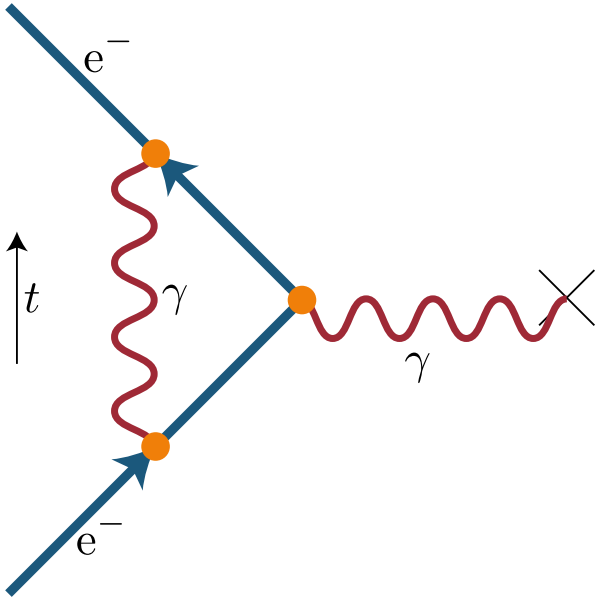
# Il Fattore $g_{\mathrm{e}}$ di un Elettrone (IV)

## Momento Magnetico Anomalo

- Nel 1947 Schwinger finalmente riuscì a calcolare il contributo di un **singolo circuito** di fotoni virtuali al **fattore $g_{\mathrm{e}}$** dell'elettrone.
- Il risultato contiene una costante fondamentale della natura, nota come **costante di struttura fine $\alpha$**, che misura la carica elettrica dell'elettrone ($\alpha = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 hc}$) e ha un valore numerico pari a circa $\alpha \approx \frac{1}{137}$.
- Schwinger ha mostrato che il contributo di un **circuito** al **fattore $g_{\mathrm{e}}$** dell'elettrone è $\frac{\alpha}{\pi} \approx 0.00232$, per cui risulta $g_{\mathrm{e}} \approx -2.00232$.
- La differenza:

$$a_{\mathrm{e}} = \frac{|g_{\mathrm{e}}| - 2}{2} \approx 0.00116 \qquad [3]$$

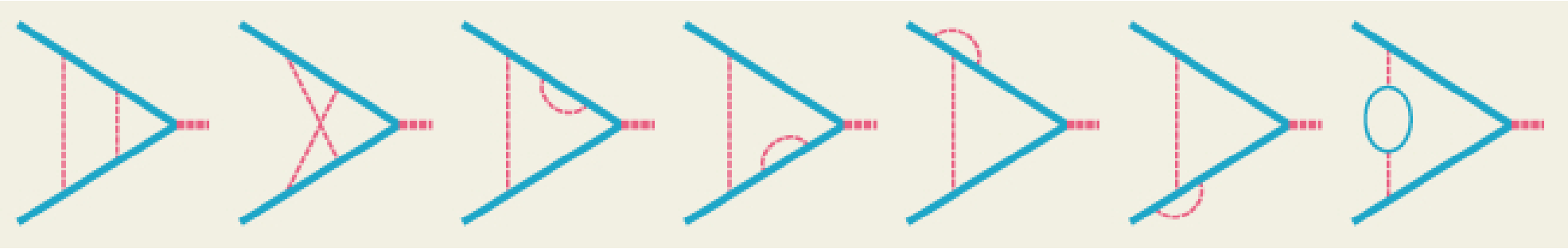
è denominata **momento magnetico anomalo** dell'elettrone.



# Il Fattore $g_e$ di un Elettrone (V)

## Diagrammi di Feynman con 2 Circuiti

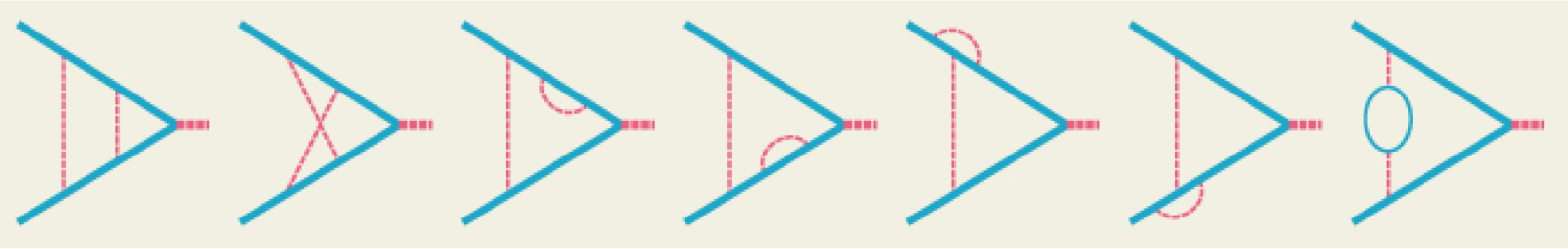
- Volento **migliorare la precisione**, si possono considerare anche i **diagrammi di Feynman** a **2 circuiti**.
- Disegnare i **7 possibili** diagrammi di Feynman a **2 circuiti** è la parte più semplice per comprenderne gli effetti;
- La parte difficile è calcolare il contributo di ciascun diagramma al valore del **fattore $g_e$**.
  - L'espressione matematica associata ad un **diagramma** ha la forma di un **integrale**, che riassume le ampiezze di una famiglia infinita di percorsi di particelle.
  - Alcuni degli integrali a **2 circuiti** sono **complicati** da calcolare e i primi tentativi di valutarli non sono andati a buon fine.



# Il Fattore $g_e$ di un Elettrone (VI)

## Diagrammi di Feynman con 2 Circuiti

- Il calcolo dei **7 diagrammi** di Feynman con **2 circuiti** non fu completato fino al 1957.
- Il risultato è nuovamente espresso in termini della **costante di struttura fine** $\alpha$, ma, riflettendo la probabilità molto più bassa di un evento a **2 circuiti**, il termine $\frac{\alpha}{\pi}$ è ora elevato al quadrato, quindi $\left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2$.
- La costante $\left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2$ è moltiplicata per un curioso **coefficiente** che combina varie **frazioni razionali**, **logaritmi** e la **funzione zeta di Riemann** $\zeta(s)$:
  - Tale funzione zeta di Riemann $\zeta(s)$ è familiare nella teoria dei numeri ma un intruso esotico nella fisica.



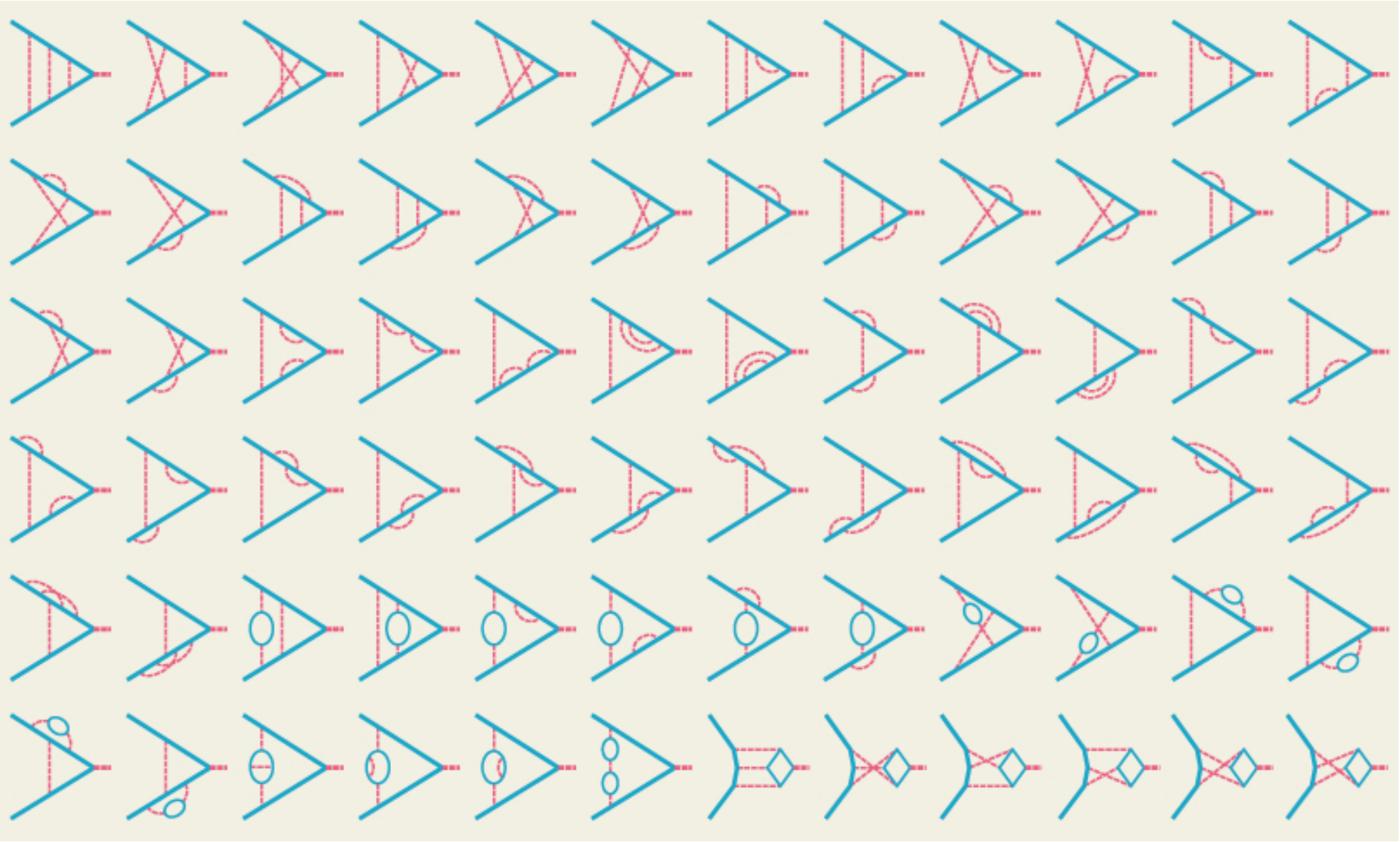
# Il Fattore $g_e$ di un Elettrone (VII)

## Diagrammi di Feynman con 3 Circuiti

- Per migliorare ancora la precisione si possono includere nel calcolo i **diagrammi di Feynman a 3 circuiti**.
- Tuttavia, per un evento elettrone-fotone con tre circuiti ci sono **72 diagrammi di Feynman**, che rappresentano integrali di **scoraggiante difficoltà**.
- Quando negli anni '60 iniziò il lavoro sulla valutazione di questi integrali, divenne presto chiaro che i metodi dell'**algebra fatta con carta e matita** avevano raggiunto i loro limiti.
- In questo modo i calcoli dei diagrammi di Feynman divennero un importante impulso allo sviluppo di **sistemi di calcolo simbolico**, programmi per computer in grado di **manipolare** e **semplificare le espressioni simboliche**.
- Nonostante questi potenti strumenti computazionali, alcuni dei diagrammi a tre circuiti hanno resistito alla soluzione analitica per 30 anni.

# Il Fattore $g_{\mathrm{e}}$ di un Elettrone (VIII)

## Diagrammi di Feynman con 3 Circuiti



# Il Fattore $g_e$ di un Elettrone (IX)

## Diagrammi di Feynman con 3 e 4 Circuiti

- Fu solo nel 1995 che Toichiro Kinoshita della Cornell University pubblicò un valore affidabile e di alta precisione del contributo dei tre circuiti:
  - Kinoshita ha valutato **numericamente** tutti i **72 diagrammi**, confrontando e combinando i suoi risultati con **valori analitici** allora noti per **67 diagrammi**.
- Un anno dopo, gli ultimi diagrammi furono risolti **analiticamente** da Ettore Remiddi e Stefano Laporta, fisici teorici dell'Università di Bologna.
- La correzione a tre circuiti è proporzionale ad $\left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3$, il che rende il suo ordine di grandezza **inferiore a una parte per milione**.
- I **diagrammi di Feynman a 4 circuiti** sono **891**:
  - Affrontare tutti questi diagrammi intricati con **metodi analitici** per ora è un'impresa senza speranza;
  - I **calcoli numerici** sono in corso dall'inizio degli anni '80:
    - Un **aumento di 1000 volte del tempo di calcolo** investito nell'attività ha comportato un **miglioramento di 30 volte nella precisione**.

# Il Fattore $g_{\mathrm{e}}$ di un Elettrone (X)

## Risultati

- I migliori calcoli teorici fino a ora hanno incluso anche **diagrammi di Feynman a 5 circuiti**;
- I valori **sperimentale** e **teorico** del momento magnetico anomalo $a_{\mathrm{e}}$ dell'elettrone sono attualmente:

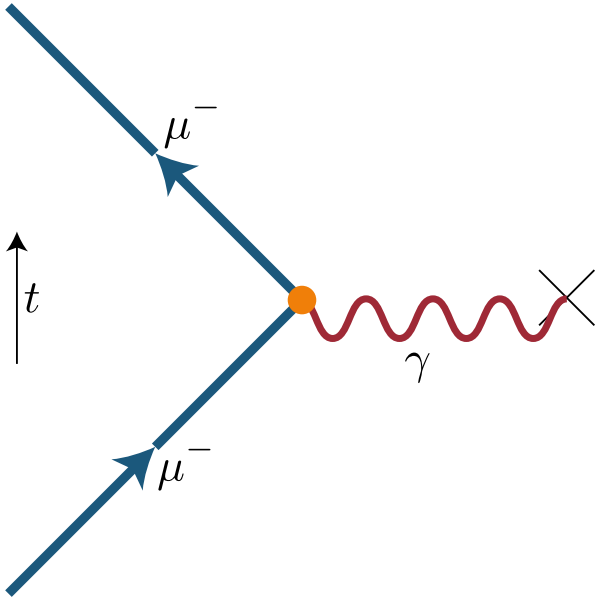
$$\begin{aligned} a_{\mathrm{e}}^{(\mathrm{exp})} &= 1.159\,652\,180\,73 \quad \times 10^{-3} \\ a_{\mathrm{e}}^{(\mathrm{th})} &= 1.159\,652\,180\,252 \times 10^{-3} \end{aligned} \qquad [4]$$

  da confrontare con il valore [3] (diap. 45) ottenuto limitandosi a **un solo circuito**.
- L'**accordo** tra teoria ed esperimento è **eclatante**: la **precisione** è pari a circa **1 parte per miliardo** ($10^{-9}$).
- Il risultato [4] è una delle **più importanti conferme sperimentali** della **QED** (elettrodinamica quantistica).

# Il Fattore $g_\mu$ di un Muone

## Le Difficoltà del Calcolo

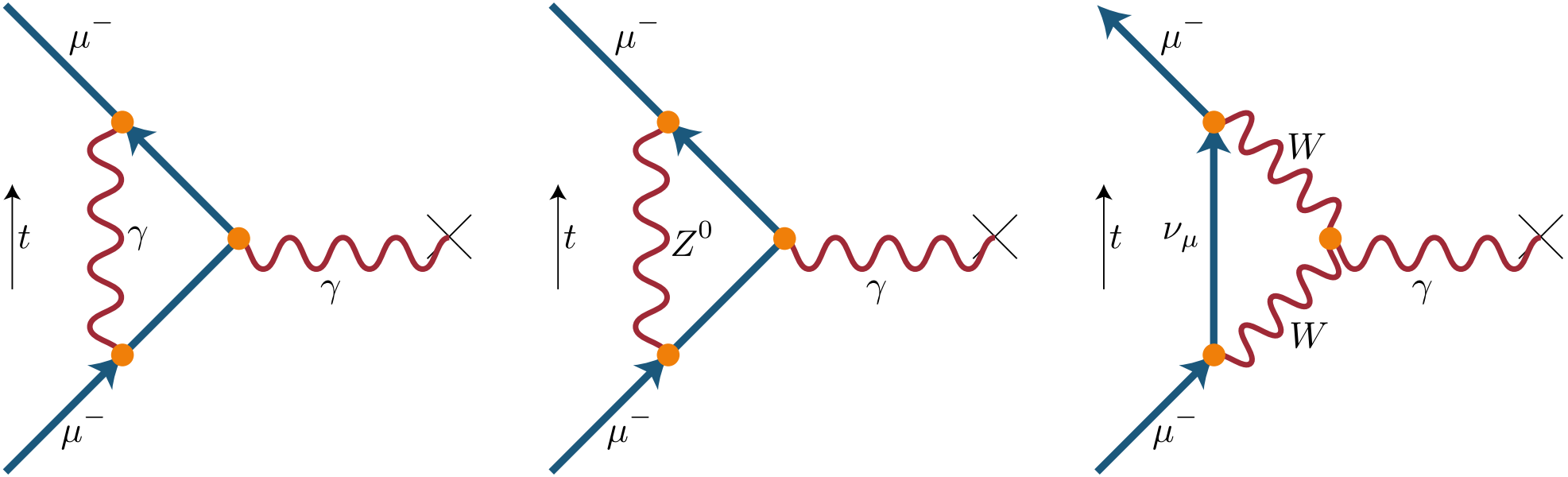
- Gli stessi calcoli svolti per l'elettrone potrebbero essere ripetuti — in linea di principio — per il muone.
- L'elettrone e il muone sono gemelli (o tripletti, poiché esiste un terzo fratello chiamato tauone, si veda diap. 19). L'unica differenza apparente tra loro è la massa, in quanto il muone è $\sim 200$ volte più pesante dell'elettrone.
- La massa conta moltissimo nel calcolo di $g$. Poiché alcuni effetti sono proporzionali al quadrato della massa, nel muone essi sono intensificati $40\,000$ volte.



# Il Fattore $g_\mu$ di un Muone (II)

## Le Difficoltà del Calcolo

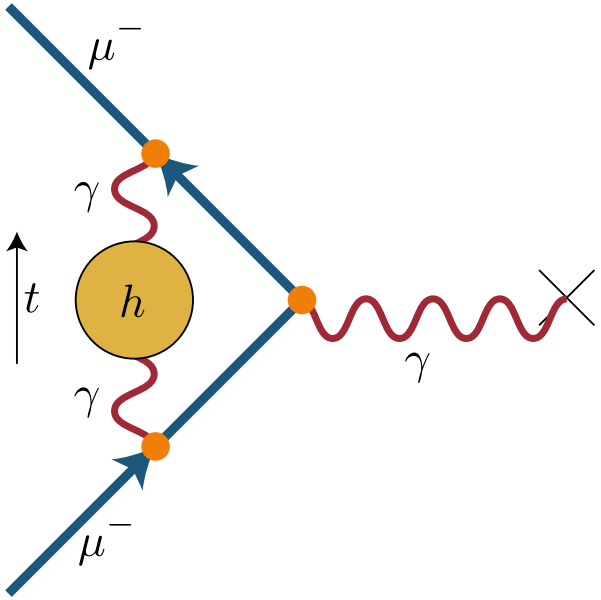
- Di conseguenza, il **fattore muonico $g_\mu$** dipende non solo dalle **interazioni elettromagnetiche** ma anche dalle manifestazioni delle **forze nucleari deboli** e **forti**:
  - Le particelle virtuali che compaiono nei **diagrammi di Feynman dei muoni** includono i soliti **fotoni** ed **elettroni**, ma anche oggetti più pesanti come i **bosoni W** e **Z** (quanti della forza debole) e le particelle fortemente interagenti conosciute collettivamente come **adroni**.



# Il Fattore $g_\mu$ di un Muone (III)

## Le Difficoltà del Calcolo

- Un quadro teorico chiamato **Modello Standard** (si veda **diap. 19**) estende le idee della **QED** alle **forze forti** e **deboli**;
- Sfortunatamente, tuttavia, la teoria **non** sempre consente **calcoli ad alta precisione partendo dai principi primi** come fa la QED;
- I **contributi della forza forte** (**QCD**, **cromodinamica quantistica**) devono essere calcolati su una **base più empirica**:
  - L'approccio **perturbativo**, usato per la QED, **nella QCD non funziona a basse energie** ($\approx 100\ \mathrm{MeV}$);
  - L'approccio attuale alla determinazione di tale contributo consiste nell'utilizzo di un **gran numero** di **misure sperimentali** da cui esso si ricava mediante un sofisticato adattamento combinato;
  - L'alternativa sarebbe un **calcolo non-perturbativo** di **QCD su reticolo**, ma esso **non riesce ancora** a **raggiungere la precisione necessaria**.



# Il Fattore $g_\mu$ di un Muone (IV)

## I Risultati Attuali

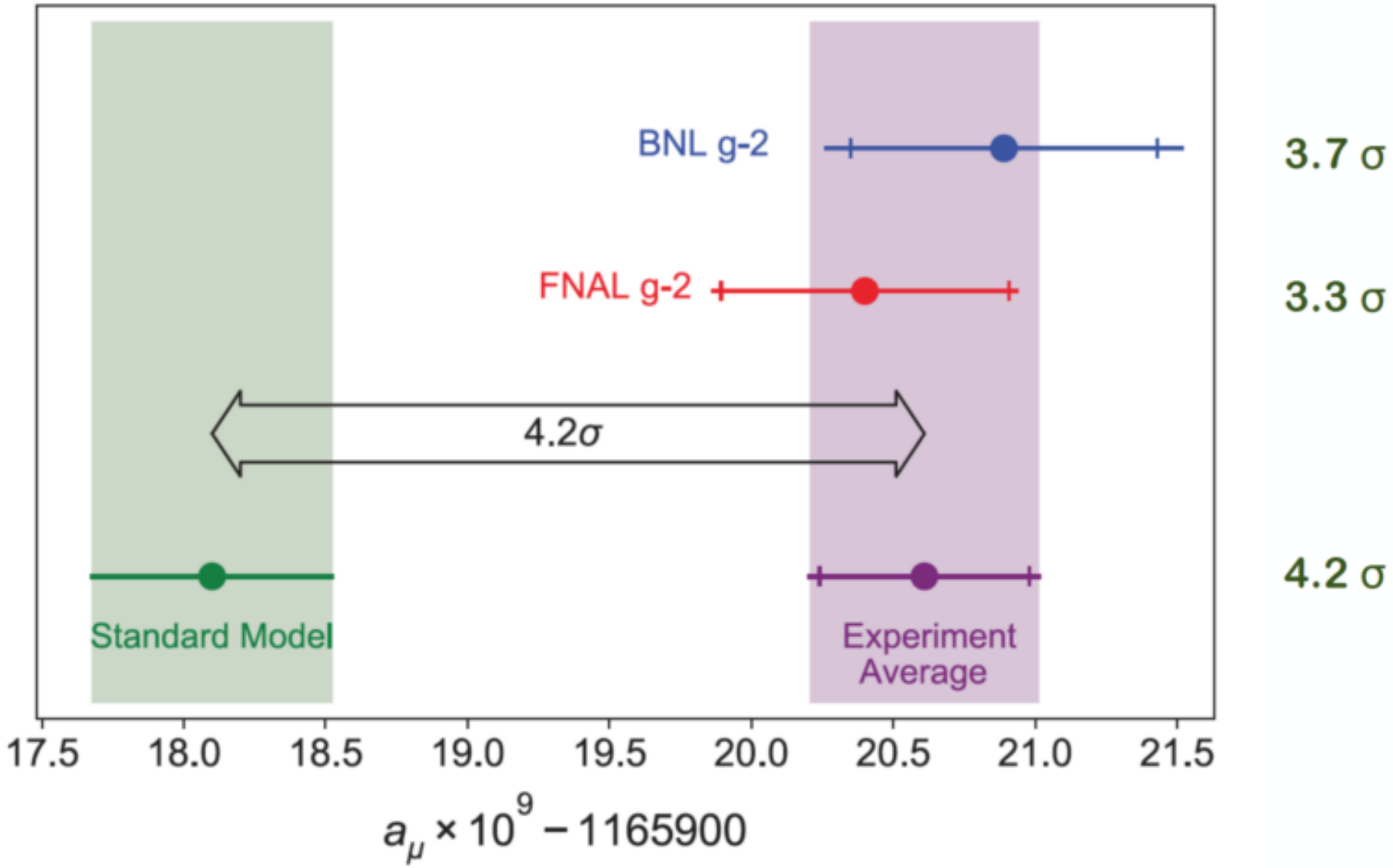
- Di conseguenza, anche il **valore teorico** del **fattore $g_\mu$ muonico** si basa **in parte su risultati sperimentali**.
- I valori più recenti del momento magnetico anomalo del muone sono:

$$
\begin{aligned}
a_{\mathrm{e}}^{(\mathrm{exp})} &= 1.165\,920\,61 \times 10^{-3} \\
a_{\mathrm{e}}^{(\mathrm{th})} &= 1.165\,918\,10 \times 10^{-3}
\end{aligned}
\qquad [5]
$$

- La discrepanza è piccola:
  - Tuttavia, essendo le due misure molto precise, risulta pari a **circa 4.2 deviazioni standard**.
- Il primo **esperimento** per la misura del momento magnetico anomalo del muone si è svolto nel 1959–1961 al CERN.
- L'ultimo si è svolto al Fermilab (Ilinois, USA) nel 2017–2023.

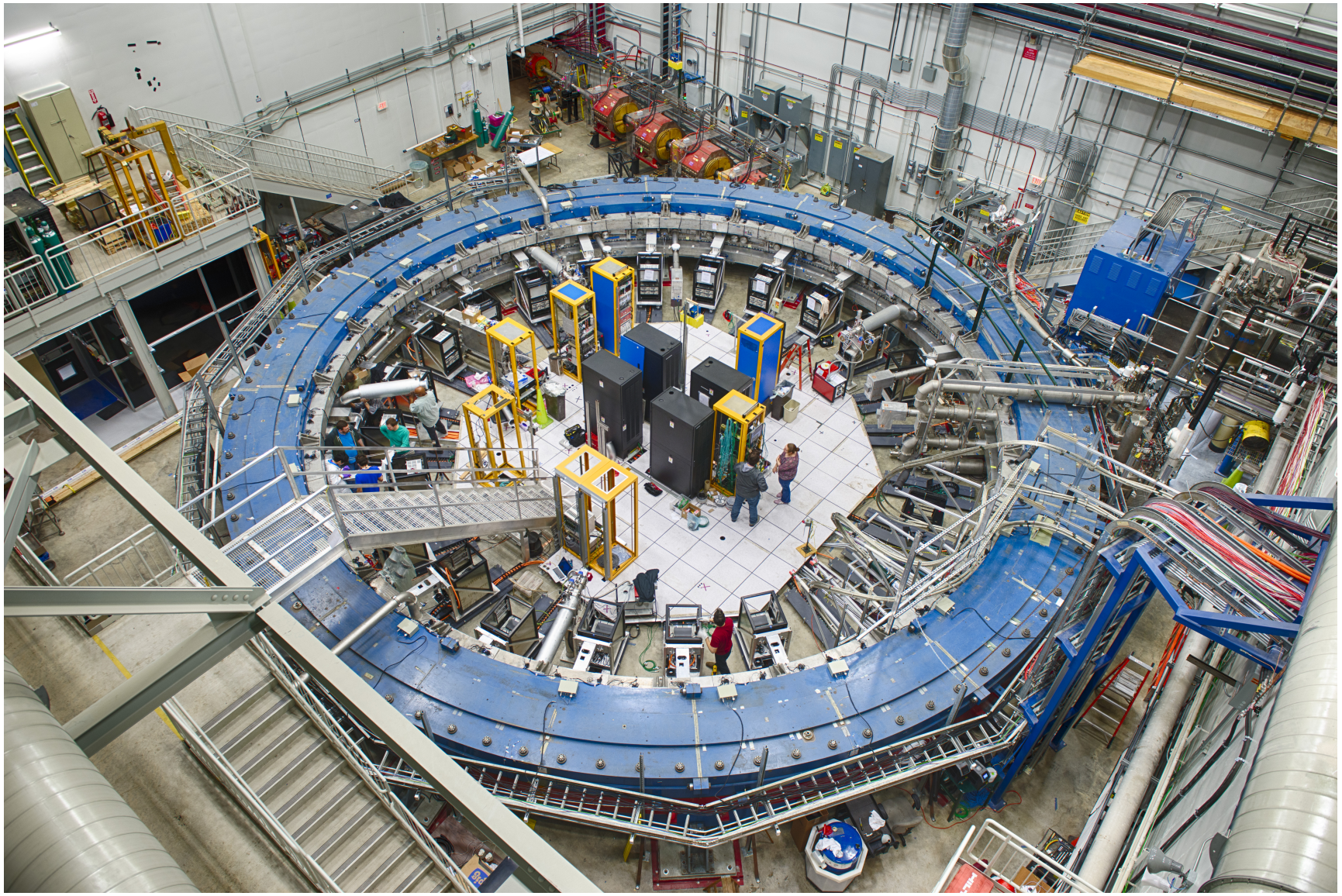
# Il Fattore $g_\mu$ di un Muone (V)

## I Risultati Attuali



# Il Fattore $g_\mu$ di un Muone (VI)

## Esperimento g-2 al FNAL, Fermilab, Ilinois, US



# Il Fattore $g_\mu$ di un Muone (VII)

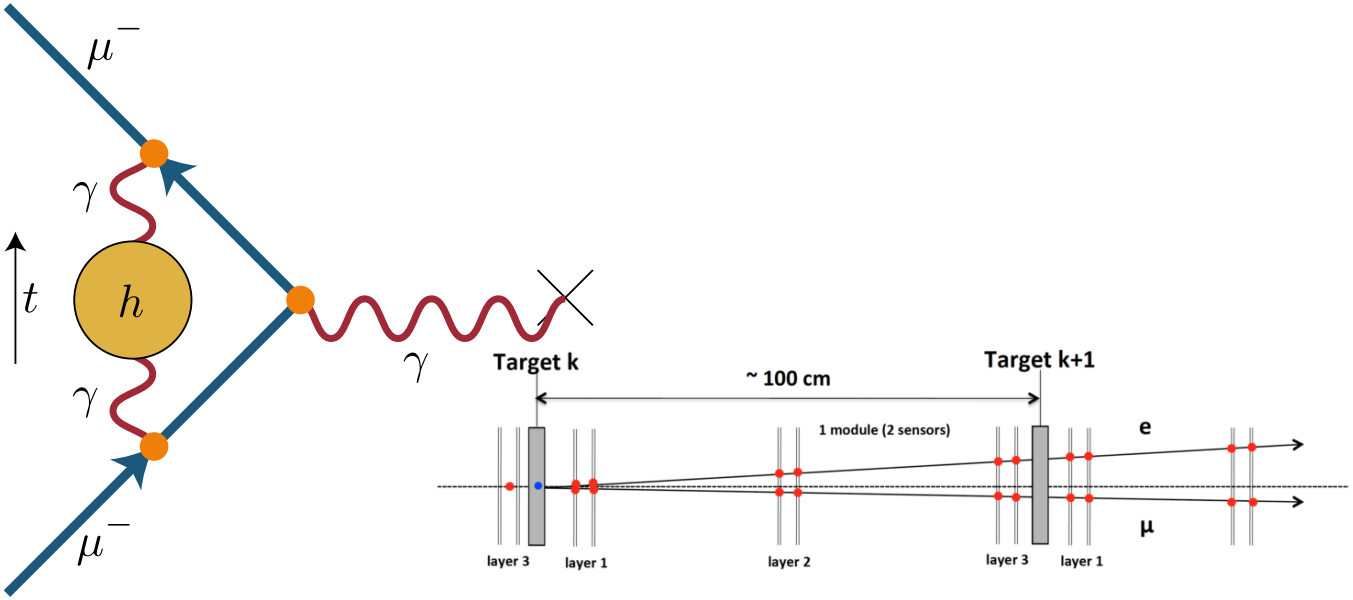
## Esperimento g-2 al FNAL, Fermilab, Ilinois, US

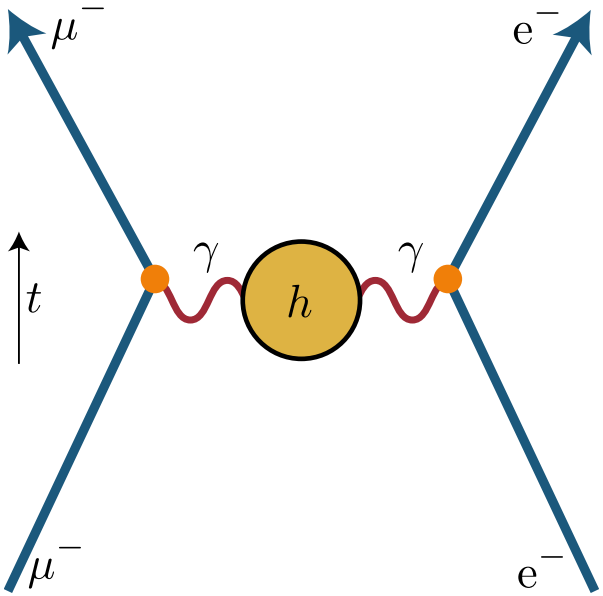
- I **muoni** possono essere prodotti in gran numero dall'acceleratore del Fermilab e iniettati all'interno dell'**anello di accumulazione magnetico** di Muon g-2, del **diametro di 15 metri**, dove sono fatti circolare migliaia di volte con velocità prossima a quella della luce.
- All'interno dell'anello di Muon g-2, il momento magnetico dei muoni acquista un moto di **precessione** attorno alla direzione del campo magnetico, analogo a quello di una trottola in rotazione. L'esperimento misura con altissima precisione la **frequenza** di questo moto di precessione dei muoni.
- Mentre i muoni viaggiano attorno all'anello, decadeno continuamente in **neutrini** e **positroni**. I neutrini volano via senza essere rilevati, ma i positroni, che viaggiano nella stessa direzione in cui puntava il momento magnetico quando il muone è decaduto, possono essere misurati.

# Il Fattore $g_\mu$ di un Muone (VIII)

## Progetto di Esperimento MUonE

- L'esperimento MUonE si propone di determinare il **contributo adronico alla polarizzazione del vuoto**, **ricavandola** dalla misura, effettuata con una precisione senza precedenti, della sezione d'urto differenziale della **diffusione elastica** $\mu$–e, espressa come funzione del 4-impulso trasferito.
- L'esperimento si propone effettuare la misura utilizzando l'intenso fascio di muoni disponibile al CERN, con energia di 150 GeV, incidente sugli elettroni atomici di un bersaglio leggero.



# Il Fattore $g_\mu$ di un Muone (IX)

## Conclusioni

- Il **momento magnetico del muone** è una delle grandezze fisiche misurate con **maggiore precisione** (più di una parte per miliardo);
- Essa è anche **calcolabile con una precisione estremamente elevata nel Modello Standard**, per cui costituisce una delle verifiche più stringenti per la teoria;
- Il **momento magnetico del muone** è forse la sola chiara **deviazione dal Modello Standard** nel panorama della fisica delle alte energie;
- Sono state formulate ipotesi che tentano di spiegare questa deviazione come un effetto quantistico di **nuove particelle esotiche**:
  - Ogni **particella** o **forza sconosciuta** in natura potrebbe contribuire in aggiunta a quelle già conosciute;
- Tuttavia è ancora possibile che la discrepanza sia il risultato di un **errore sistematico nelle misure sperimentali** oppure nel **calcolo teorico**.

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA


# Domenico Galli

## DIFA – Dipartimento di Fisica e Astronomia “Augusto Righi”

domenico.galli@unibo.it

https://www.unibo.it/sitoweb/domenico.galli

https://www.linkedin.com/in/domenico-galli-28b94b28

Presentazione realizzata mediante LaTeX e beamer.


Testo e figure sono disponibili con licenza Creative Commons – Attribuzione – Non commerciale – Condividi allo stesso modo – 4.0 Internazionale. Per leggere una copia della licenza, si visiti il sito web: https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.it oppure si spedisca una lettera a Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.