



UNIVERSITA' DELLA CALABRIA

Dipartimento di FISICA

Scuola di Dottorato

“ARCHIMEDE” in SCIENZE, COMUNICAZIONE E TECNOLOGIE

Indirizzo

FISICA E TECNOLOGIE QUANTISTICHE

CICLO

XXVI

TITOLO TESI

VIAGGIO NEL MONDO DEI QUANTI.

Le avventure di Alice nel paese delle meraviglie quantistiche

Settore Scientifico Disciplinare FIS/08

Direttore:

Ch.mo Prof. Pietro Pantano

Firma Pietro Pantano

Supervisore:

Ch.mo Prof. Francesco Piperno

Firma Francesco Piperno

Dottorando: Dott.ssa Valentina Santopaolo

Firma Valentina Santopaolo

INDICE

PRIMA PARTE

PRESUPPOSTI TEORICI

ABSTRACT.....pag. 4

CAPITOLO 1 - DIVULGAZIONE SCIENTIFICA E ADOLESCENTI

1.1 L'IMPORTANZA DELLA DIVULGAZIONE.....6

1.2 CARATTERISTICHE DELLA DIVULGAZIONE SCIENTIFICA.....10

1.3 MODELLI APPROPRIATI PER I NATIVI DIGITALI.....13

CAPITOLO 2 - FUMETTO E RACCONTO ILLUSTRATO COME STRUMENTI DI DIVULGAZIONE SCIENTIFICA

2.1 IL RACCONTO ILLUSTRATO COME STRUMENTO DI DIVULGAZIONE
SCIENTIFICA.....17

2.2 IL FUMETTO COME STRUMENTO DI DIVULGAZIONE SCIENTIFICA.....24

2.3 PANORAMA INTERNAZIONALE E NAZIONALE.....32

2.4 LA SCELTA DELLA STORIA.....43

2.4.1 I PROTAGONISTI.....45

2.5 L'OBIETTIVO DEL RACCONTO.....49

2.6 ILLUSTRAZIONI, GRAFICA E DISTRIBUZIONE.....51

CAPITOLO 3 - METODOLOGIA E STRATEGIE DIDATTICHE

3.1 SCELTA DELLE STRATEGIE DIDATTICHE.....	53
3.2 SIMILITUDINI, ANALOGIE, METAFORE.....	55
3.3 SFONDO INTEGRATORE.....	59
3.4 MAPPA CONCETTUALE.....	64
3.5 IMAGING.....	67
3.6 LINGUAGGIO.....	69
3.7 RISULTATI ATTESI.....	71

SECONDA PARTE

RISULTATI SPERIMENTALI

CAPITOLO 4

FUMETTO “VIAGGIO NEL MONDO DEI QUANTI”	73
--	----

CAPITOLO 5

RACCONTO ILLUSTRATO “VIAGGIO NEL MONDO DEI QUANTI”	109
--	-----

CONCLUSIONI	184
--------------------------	-----

BIBLIOGRAFIA	186
---------------------------	-----

SITOGRAFIA	191
-------------------------	-----

ABSTRACT

L'era digitale, internet e la multimedialità hanno notevolmente modificato il modo in cui ragazzi e adolescenti fruiscono le informazioni, rispetto alla precedente generazione. Abbiamo di fronte degli individui, i nativi digitali, che hanno accesso giornaliero ai social network, agli smartphone, alle app, tutti ricchi di contenuti multimediali che implicano una propensione verso le immagini, la lettura veloce e il multitasking. Sono cresciuti con una minore capacità di attenzione verso il testo scritto e un'attenzione più spiccata verso l'immagine. Tutto ciò deve far riflettere sulla necessità di creare nuovi modelli e contenuti per la divulgazione scientifica, che siano più appropriati e si adeguino al nuovo modo di approcciarsi e fruire le informazioni.

Il presente progetto propone un prodotto multimediale che comprende il fumetto, il libro illustrato e il CD interattivo come mezzo alternativo di comunicazione e insegnamento della fisica quantistica agli adolescenti, essendo questi contenuti molto prossimi ai modelli comunicativi che risultano familiari agli adolescenti.

Contenuto del progetto è una storia, con un personaggio molto noto, Alice del celebre romanzo di Lewis Carroll, *Alice's Adventures in Wonderland*, protagonista di un viaggio "alternativo" rispetto a quello che 'storicamente' ha fatto. Un viaggio

in un mondo popolato da elettroni, fotoni e scienziati impegnati a spiegare gli strani principi della fisica quantistica, che sembrano curiosi almeno quanto quelli del paese delle meraviglie.

CAPITOLO 1

DIVULGAZIONE SCIENTIFICA E ADOLESCENTI

1.1 L'IMPORTANZA DELLA DIVULGAZIONE

Nell'epoca moderna, uno dei più importanti esempi di interesse collettivo nei confronti della scienza, fu la previsione (e l'attesa che ne derivò), ad opera dall'astronomo inglese Edmond Halley, del ritorno della cometa che ora porta il suo nome. Nelle sue "Tabulae Astronomicae" nel 1696 ne predisse il ritorno per la fine del 1758 o per l'inizio del 1759. La cometa non si fece attendere. A scoprirla fu Johann Georg Palitzsch, un agricoltore appassionato di astronomia che viveva in un paese della Sassonia. Il ritorno previsto della cometa ha significato, nella pubblica opinione, la vittoria della fisica inglese su quella continentale.

Se ci riferiamo invece alla storia contemporanea, l'attenzione da parte del grande pubblico per la scienza risale ad un anno preciso: il 1957. L'occasione fu il lancio dello Sputnik, il primo satellite artificiale in orbita intorno alla Terra nella storia, da parte dell'Unione Sovietica. La notizia provocò il panico generale nella popolazione americana, facendo nascere l'esigenza di creare degli strumenti per informare le persone. In quell'anno è nata quindi la American Association for the Advancement of Science e sono stati ideati programmi per aumentare

l'informazione: documentari, pubblicazioni per non esperti, corsi scolastici di base.

A partire da quegli anni si è assistito ad un costante sviluppo scientifico e tecnologico, di difficile o addirittura impossibile comprensione da parte delle persone comuni. Lo sviluppo diacronico delle discipline scientifiche inoltre è generalmente legato alla loro specializzazione: man mano che una disciplina si sviluppa, è facile che essa diventi sempre meno comprensibile per i non specialisti. Questo vale non solo per discipline diverse tra loro come ad esempio la fisica e la biologia, quanto – cosa ancora più rilevante – all'interno di una stessa disciplina. Valga come esempio: è quasi certo che un fisico sanitario ignori completamente la fisica delle alte energie. A prova di ciò basta ricordare l'evoluzione, nel corso di poco più di un secolo, di *Physical Review*, una delle più antiche e prestigiose riviste scientifiche che pubblica ricerche su tutti gli aspetti della fisica. Fondata nel 1893, si divise nel corso degli anni, in linea con l'evoluzione e la conseguente specializzazione della disciplina, in *Physical Review Letters*, ricerca fondamentale in tutti i campi di fisica; *Physical Review A*, fisica atomica, subatomica e fisica ottica; *Physical Review B*, fisica della materia condensata e scienza dei materiali; *Physical Review C*, fisica nucleare e *Physical Review D*, pubblicazione in cui trovano spazio teoria quantistica dei campi, gravitazione, e cosmologia. Una quinta pubblicazione sorella, *Physical Review E*, fu introdotta nel 1993 per ospitare la vasta quantità di nuove ricerche sulla dinamica non lineare. Esistono

inoltre *Physical Review Focus*, articoli selezionati dalle *Physical Review Journals*, *Physical Review Special Topics — Accelerators and Beams*, acceleratori di particelle e fasci e infine *Physical Review Special Topics — Physics Education Research* sull'insegnamento della fisica.

A questo punto non è difficile immaginare cosa succeda se ci riferiamo a chi addirittura non appartiene al campo scientifico. Sebbene la conoscenza avanzi, cresce anche l'ignoranza verso qualsiasi fenomeno che non appartenga strettamente al proprio campo di studi.

Da qui è nata l'esigenza di affiancare la comunicazione scientifica - atto di scambio e di diffusione nell'ambito della comunità scientifica dei risultati acquisiti e delle scoperte raggiunte - alla divulgazione, diretta invece a raggiungere, con un linguaggio più "semplice", un pubblico molto ampio, con caratteristiche culturali disomogenee come quelle che possono riscontrarsi nel mondo umanistico, industriale, economico e così via.

La divulgazione scientifica si pone dunque come ponte di congiunzione tra il grande pubblico e la comunità scientifica, tenta di rendere "a portata di mano" conoscenze spesso ritenute incomprensibili e inarrivabili e soddisfare l'attenzione, soprattutto delle giovani generazioni, verso tematiche di scienza.

A proposito dell'importanza della divulgazione scientifica scrive Tommaso Maccacaro, astronomo dell'Istituto Nazionale di Astrofisica: «È solamente volgarizzando la scienza, rendendola realmente e ampiamente accessibile che si

gettano le basi perché il sapere, non rimanendo circoscritto a pochi, possa avere ricadute più ampie e diffondersi rapidamente nella società».¹

Parafrasando Bernard Schiele, possiamo affermare che il tipo di informazione che questa disciplina offre è incidentale, non pretende quindi di insegnare qualcosa ma di informare con precisione e freschezza. Lo scopo è quello di avvicinare il pubblico a tematiche spesso considerate troppo difficili, attraverso strumenti alternativi alla lezione scolastica e all'articolo specialistico. Questo strumento deve essere scelto con cura, dopo aver analizzato in maniera approfondita il proprio target.²

Sulla base di queste considerazioni, e valutato il mio percorso di studi, ho scelto, come forma alternativa di divulgazione scientifica per ragazzi, di "raccontare una storia", opportunamente modellata sul tema che ho scelto affrontare, considerandola un metodo efficace per raggiungere il pubblico a cui è destinata. La storia è stata scritta nella duplice forma di un fumetto e di un racconto illustrato, una sorta di racconto del racconto, che spiegasse in maniera più dettagliata l'esperienza avuta dalla protagonista del fumetto.

¹ T. Maccacaro (2012)

² P. Baranger, B. Schiele (2013)

1.2 CARATTERISTICHE DELLA DIVULGAZIONE SCIENTIFICA

Una delle differenze più rilevanti tra la comunicazione tra scienziati e la divulgazione, è la presenza, in quest'ultima, di componenti emotive e personali.

La comunicazione fra scienziati è neutra, priva di emozioni. Ciò che deve motivare e convincere, in questo caso, non è la persona che scrive o la speranza che la teoria sia giusta, ma solo gli esperimenti. Altro è la divulgazione scientifica, per la quale non basta la correttezza dell'argomentazione o dei dati. Il dato, che per un ricercatore è un tassello che va ad aggiungersi a un quadro di conoscenze che conosce bene, per il pubblico è solo un frammento isolato di informazione, quasi privo di significati. Se agli scienziati James Dewey Watson e Francis Crick bastò un articolo breve e asciutto sulla rivista "Nature" per soddisfare la comunità scientifica, che attendeva la soluzione dell'enigma del DNA, per colpire l'opinione pubblica fu necessario "La doppia elica", un libro scritto dallo stesso Watson, che ricreava tutto il contesto di quella ricerca, narrando in modo vivace e provocatorio i retroscena dell'avventura intellettuale che aveva portato alla clamorosa scoperta. In altre parole, a parlare fu una persona.

Nella divulgazione scientifica l'emozione è un elemento da tenere in considerazione; non è un accessorio né un qualcosa per suscitare attenzione. Ai fini persuasivi, anzi, fiducia ed emozioni positive possono essere anche più

importanti di fatti e argomentazioni inoppugnabili. Scrive Giovanni Carrada: «Il primo passo di ogni comunicazione pubblica è, quindi, individuare l'emozione sulla quale fare leva. Una semplice esposizione dei fatti, che risulti emotivamente piatta, infatti, "non passa", o comunque viene subito dimenticata»³. Questo semplice fatto, ben noto ai retori del mondo antico, è stato peraltro sottolineato anche dalle neuroscienze, che sostengono l'apporto decisivo dei sentimenti e delle emozioni nelle nostre capacità cognitive. «Le emozioni tessono la tela dei nostri stati d'animo, condizionando le nostre scelte e ciò che viene memorizzato nella nostra mente e, di conseguenza, modellano il nostro apprendimento»⁴

È possibile conferire emozione ad un argomento, quindi a un testo, in molteplici modi: si può suscitare meraviglia per il funzionamento della natura, curiosità intellettuale, ricerca di risposte a grandi domande sull'esistenza o a grandi problemi del mondo, il piacere di lavorare in ambienti speciali e così via. Un'argomentazione costruita in questo modo aiuta a passare dal «comunicare qualcosa», tipico della comunicazione fra specialisti, al «comunicare con qualcuno». Nella divulgazione scientifica, altro aspetto da considerare, è, infatti che non avviene semplicemente un mero trasferimento di informazioni ma bisogna tenere presente che queste ultime si scambiano sempre all'interno di una relazione fra chi parla e chi ascolta, nella quale la componente emozionale

³ G. Carrada (2005)

⁴ I. Salzberger-Wittenberg, G. Henry-Polacco., E. Osborne (1993)

influenza in modo decisivo la capacità di riconoscere, valutare ed eventualmente conservare le informazioni proposte. Per questo un lavoro scientifico può avere anche moltissimi autori, mentre un libro o un articolo divulgativo ne hanno generalmente solo uno.

1.3 MODELLI APPROPRIATI PER I NATIVI DIGITALI

Pensare e progettare qualcosa per gli adolescenti di oggi vuol dire confrontarsi con la generazione che lo studioso Marc Prensky ha definito "nativi digitali", cioè «chi è abituato fin da giovane o giovanissimo a utilizzare le tecnologie digitali e che quindi padroneggia come un "parlante nativo" il linguaggio digitale dei computer, dai videogiochi a Internet».⁵

Vengono considerati nativi digitali i ragazzi, nati tra il 1998 e il 2000, che quindi oggi frequentano le scuole medie, considerando il 1996 come data di inizio di questa nuova fase, anno in cui l'accesso a Internet è diventato massivo.⁶

Ci troviamo al cospetto di una generazione completamente diversa da quella precedente; una generazione che non usa libri ma app, non ha mai frequentato una biblioteca preferendo le ricerche sul web. I nativi digitali usano i social network come mezzo reale di interazione sociale. Hanno una mano sul mouse e davanti agli occhi lo schermo di un pc; con l'altra scrivono messaggi sullo smartphone, un auricolare porta ad un orecchio la musica e con l'altro seguono la Tv.

Per queste ragioni vengono definiti "multitasking" ed essenzialmente visivi.

⁵ M. Prensky (2001)

⁶ AA. VV. (2012)

La nuova generazione svolge generalmente molte azioni contemporaneamente, il loro modo di elaborare le informazioni è molto veloce ma meno approfondito. Il termine "multitasking" è usato per descrivere questa tipologia di attività mentale, quella che i ragazzi adottano quando utilizzano le nuove tecnologie.

Tutte le nuove tecnologie, computer, smartphone, tablet, sono progettate e disegnate con un approccio multifinestra, cioè con una struttura in grado di tenere attive più funzioni contemporaneamente: i sistemi operativi permettono l'attivazione di più programmi (per esempio Skype e Windows Media Player), i browser (come Mozilla o Explorer) consentono di tenere aperte simultaneamente numerose pagine web; ed è addirittura possibile attivare più programmi mentre si aprono più pagine web.

Da queste considerazioni scaturiscono, inevitabilmente, ulteriori riflessioni riguardo al cambiamento del modo di apprendimento dei giovani digitali.

L'apprendimento è regolato da componenti biologiche, quindi innate, ma anche ambientali, in cui il contesto e l'esperienza giocano un ruolo fondamentale.

Nel giro di pochi anni si è passato dall'apprendimento alfabetico per accumulazione all'apprendimento multitasking per navigazione/cooperazione.

Come sostiene Étienne Wenger «L'insegnamento/apprendimento è un processo "emergente", sociale e culturalmente situato, bisogna quindi trovare il modo di poter gestire questo processo complesso e articolato e trovare un equilibrio tra

programmazione e processi emergenti, rimodellando progressivamente il *setting* didattico». ⁷

Se il multitasking abbassa l'attenzione e limita l'apprendimento, (generalmente il cervello presta attenzione soltanto ad una cosa alla volta col risultato che tutte le azioni svolte diventano poco accurate), bisognerebbe ripensare la didattica e i modelli di insegnamento.

Date queste premesse molti studiosi e insegnanti ritengono imprescindibile la totale revisione dei modi e dei dispositivi apprendimento, revisione indispensabile per far fronte al nuovo modo di elaborare le informazioni da parte della generazione digitale. ⁸

Una delle soluzioni adottate negli USA è mettere in relazione la componente scolastica con la componente digitale e social, permettendo ai ragazzi di fruire la conoscenza attraverso mezzi che sono loro noti e che li mettono a loro agio.

In questo contesto trova spazio l'idea dell'uso prevalente delle immagini come mezzo di divulgazione scientifica. L'adolescente utente medio di Internet naviga, infatti, secondo i suoi modelli di fruizione delle informazioni, che comprendono una lettura non approfondita e un approccio ai contenuti molto più veloce rispetto al classico testo scritto. Ciò significa che soffermerà la sua attenzione su contenuti ricchi di immagini, o addirittura soltanto visuali. Per questa ragione

⁷ E. Wenger (1998)

⁸ S. Besana (2012)

fumetto e racconti illustrati e possono rivelarsi un efficace strumento per la divulgazione scientifica.

Con particolare riferimento al mio lavoro mi sono chiesta cosa potesse essere adatto ad un pubblico di questo tipo. Non sono adulti, quindi un'esposizione troppo complicata con molto testo, termini tecnici e poche immagini li avrebbe annoiati; ma non sono nemmeno bambini, quindi inventare una storia "semplice" e usare uno stile grafico elementare avrebbe reso il lavoro troppo infantile e quindi poco adatto al target che avevo preso come riferimento.

Partendo da questi presupposti, ho deciso di usare, per il fumetto, uno stile grafico molto simile a fumetti come "Dylan Dog" di Sergio Bonelli Editore o ai personaggi della casa editrice "Marvel Comics" piuttosto che optare per tratti morbidi ed espressioni infantili come nelle pubblicazioni "Topolino" della Walt Disney Company. Lo stesso discorso vale per le illustrazioni del libro. Un fumetto e un racconto così progettati risulteranno più vicino agli adolescenti, ma possono, d'altra parte, essere letti da chiunque; implicano l'utilizzo di immagini senza rischiare di essere troppo infantili e richiamano il tipo di testi con immagini a cui gli adolescenti sono stati abituati dalla Rete.

CAPITOLO 2

FUMETTO E RACCONTO ILLUSTRATO COME STRUMENTI DI DIVULGAZIONE SCIENTIFICA

2.1 IL RACCONTO ILLUSTRATO COME STRUMENTO DI DIVULGAZIONE SCIENTIFICA

«E a che serve un libro, pensò Alice, senza dialoghi né figure?»
L. Carroll, "Le avventure di Alice nel Paese delle Meraviglie"

L'idea attualmente più condivisa – corroborata dalle teorie del costruttivismo e dal *situated learning*⁹ – sostiene che la comprensione e l'interiorizzazione di qualsiasi contenuto dipenda dal modo e dalla situazione in cui esso ci viene proposto: "il contesto fa da sfondo all'attività di apprendimento"¹⁰. Il racconto, come strumento di divulgazione scientifica, è capace di dar luogo a contesti significativi mediando l'azione del discente e aiutandolo a interiorizzare la conoscenza oggetto di studio.

La narrativa ha ricevuto una crescente attenzione in campo educativo negli ultimi due decenni¹¹. Innanzitutto è riconosciuta come «una forma espressiva che risulta

⁹ J. Lave, E. Wenger (2006)

¹⁰ J. Lave, E. Wenger (2006)

¹¹ G. Dettori (2007)

istintiva e naturale per persone di ogni età e cultura e aiuta a cogliere il significato di attività simboliche e a dare un senso coerente all'esperienza»¹². Inoltre, «costituisce uno strumento privilegiato per sviluppare abilità cognitive ed organizzare la conoscenza»¹³. La grande forza della narrativa risiede nel fatto che contiene una serie di legami logici fra gli elementi coinvolti; di conseguenza, ciascun elemento contribuisce a formare il significato globale e questo, a sua volta, dà significato a ogni singolo elemento. Per questa ragione, chi interagisce con un racconto arriva a comprendere più di quanto non sia esplicitamente indicato; questo dà origine a un processo di costruzione del significato. Queste considerazioni valgono sia per i racconti inventati (storie) che per quelli relativi a fatti veri (Storia e narrazioni di esperienze personali), come osservato da Ricoeur, che riconosce «una familiarità a livello di senso o struttura fra questi due tipi di narrativa».¹⁴

Anche motivazione ed emozioni, che sono importanti aspetti dell'apprendimento, al pari della cognizione, sono influenzate positivamente dalla narrativa. Già Bruner¹⁵ ha notato che, «la narrativa in tutte le sue forme è una dialettica fra aspettativa e avvenimenti», nonché «un invito a formulare problemi, non una lezione su come risolverli». Per questo motivo, l'uso della narrativa nell'apprendimento può risultare coinvolgente e stimolare la curiosità e la

¹² J. Bruner (2003)

¹³ P. Shank (2000)

¹⁴ R. C. Ricoeur (2005)

¹⁵ J. Bruner (2003)

fantasia, che sono componenti essenziali della motivazione intrinseca secondo la tassonomia proposta da Malone e Leppers¹⁶. L'influenza positiva sulla sfera emotiva deriva dal fatto che le storie sono basate su un'interazione tra personaggi e causalità; il che porta il soggetto a cogliere aspetti della personalità, stati emozionali e posizioni sociali dei personaggi, nonché le ragioni ed intenzioni che stanno dietro alle loro azioni.

Alcuni studi evidenziano le potenzialità della narrativa in relazione al contesto di apprendimento. È stato osservato, ad esempio, che «la narrativa può rendere più visibile il contesto e agevolare la negoziazione di significati in ambienti di apprendimento virtuali, può promuovere e sostenere la creazione di contesti di apprendimento significativi, che colleghino la costruzione di conoscenza con l'attività dei discenti»¹⁷.

Il racconto ha in sé queste capacità per diversi motivi:

- Contiene intrinsecamente una pluralità di vincoli logici (impliciti o espliciti); questo stimola a ragionare sul suo contenuto.
- L'oggetto di un racconto è una serie di eventi ed azioni, cioè qualcosa di concreto, siano essi relativi a fatti veri o inventati; questo la rende un solido punto di partenza per discussioni e riflessioni.

¹⁶ G. Dettori, F. Morselli (2007)

¹⁷ G. Dettori, F. Morselli (2007)

- La presenza di una “voce narrante” fa sì che la storia abbia un punto di vista, e suggerisce al contempo la potenziale esistenza di una pluralità di punti di vista e fonti di informazione, aiutando così a dare profondità e prospettiva all’oggetto di studio.
- Raccontare storie è tradizionalmente un’attività sociale, il che rende la narrativa particolarmente adatta alla creazione di contesti sociali. Questo è importante dal punto di vista dell’apprendimento, in quanto, come sottolineato da Bruner «i contesti culturali che favoriscono lo sviluppo mentale sono principalmente ed inevitabilmente interpersonali»¹⁸.

L’attività della narrazione rappresenta il modo più naturale per ricevere delle informazioni ed è un’attività presente in tutte le culture – si pensi ad esempio ai Greci, che hanno dato forma al Cielo, raggruppando le stelle in Costellazioni, e le usavano «per narrare il racconto dei gesti degli antichi Dei, degli atti dei culti dispersi, delle ferine bellezza degli animali. Già in età arcaica, il giovane greco colto che guarda il Cielo notturno lo legge come fosse un fumetto che narra luoghi fondativi della sua vita quotidiana»¹⁹. Le narrazioni hanno il potere di creare delle immagini mentali che risultano preziosi riferimenti cognitivi, perché permettono di organizzare le esperienze dando loro coerenza. Inoltre, una storia

¹⁸ J. Bruner (2003)

¹⁹ F. Piperno (2007)

ben costruita diventa appassionante, catturando la lettura o l'ascolto fino alla fine. Una storia è anche un ottimo alleato della memoria, basta ricordare, in ambito scientifico, la mela di Newton o la muffa di Fleming. Non a caso un articolo, nel giornalismo anglosassone, si chiama "story".

Scriva Carrada: «Qualunque sia il mezzo, il formato, lo scopo e il contenuto, comunicare la scienza al pubblico vuol dire saperla trasformare in una storia. Se si guarda infatti alla divulgazione che funziona, non troviamo mai qualcosa che assomiglia a un libro di testo o a un lavoro scientifico, sia pure tradotti in un linguaggio più semplice. Più o meno dissimulata troviamo sempre una storia, oppure un fatto, un concetto o ragionamento travestiti da storie.»²⁰

Componente principale della storia è una vicenda, all'interno della quale si muovono dei personaggi, un tempo e un luogo dell'azione. La vicenda che viene narrata deve quindi includere le famose «cinque W» del giornalismo anglosassone: cosa (what), chi (who), quando (when), dove (where) e perché (why).

I libri di divulgazioni scientifiche scritti negli ultimi anni in tutto il mondo e diventati *bestseller*, sono scritti, nella maggior parte dei casi, sotto forme di storie. Il saggio in senso stretto fa molta più fatica ad affermarsi. I racconti di Oliver Sacks, per esempio, – pubblicati sia su riviste ("The New Yorker" e "The New York Review of Books") che in forma di libri – aprono al lettore una finestra sulle stranezze della

²⁰ G. Carrada, (2005)

mente umana, indagate dalla neuropsichiatria, attraverso le vicende di persone vere, i suoi stessi pazienti, vicende nelle quali ogni discorso scientifico apparentemente scompare. Stephen Hawking ha raccontato la moderna teoria cosmologica in una **"Breve storia del tempo"**. Anche i saggi di Stephen Jay Gould, come **"Il pollice del panda"**, **"Risplendi grande lucciola"**, **"Bravo brontosauo"** e **"La vita meravigliosa"** prendono spesso lo spunto da episodi o personaggi.

Negli ultimi anni molti autori, per trattare argomenti specifici, hanno usato la storia della scienza per sfondo, creando dei "romanzi scientifici" e dando vita ad un vero e proprio filone editoriale, copioso e particolarmente fortunato. Il caso forse più famoso è **"L'ultimo teorema di Fermat"**, di Simon Singh, un romanzo d'avventure intellettuali, un thriller matematico, che ha per oggetto la dimostrazione del famoso teorema. Oppure **"Entanglement"** di Amir D. Aczel, che racconta, usando molti aspetti bibliografici dei fisici coinvolti, la storia della scoperta e delle applicazioni tecnologiche del fenomeno dell'entanglement.

«Una narrazione si può trovare in realtà ovunque, in documentari, servizi televisivi, trasmissioni radiofoniche, articoli per riviste, anche se solo come uno degli ingredienti, magari quello che si usa per partire destando subito l'attenzione del pubblico. La nostra mente, di fronte a nuove informazioni, cerca sempre un senso, un filo conduttore al quale aggrapparsi».²¹

²¹ G. Carrada (2005)

Il racconto ha quindi grandi potenzialità come strumento di apprendimento. Un racconto con immagini, che occupano, in percentuale, metà del libro, ne sfrutterà sia il grande potenziale in quanto genere narrativo per i motivi appena illustrati, ma si adeguerà al contempo alle esigenze degli adolescenti, così come definite nei primi paragrafi.

A questo proposito è interessante notare le ricerche di Aquiles Negrete e Cecilia Lartigue, in un lavoro del 2004²². I due ricercatori hanno studiato gli effetti della comunicazione della scienza in classe attraverso il fumetto, in quanto forma di racconto. Il loro punto di partenza è la constatazione che la principale fonte di informazione per gli adolescenti non è più la scuola ma i mass media e Internet. La narrazione come forma di intrattenimento, all'interno di un contesto scolastico, può aumentare l'interesse dei ragazzi verso la scienza, rendendola più memorizzabile e memorabile; perché nel raccontare una storia, come già sottolineato in precedenza, si instaurano dei legami logici e delle relazioni causali; e questo fa sì che il lettore sia stimolato a proseguire nella lettura per arrivare al finale. Raccontare la scienza come una storia interessante, con personaggi che interagiscono ed eventi che si susseguono, coinvolge lo studente mantenendo alta la sua attenzione (aspetto importante questo da tenere in considerazione e che si verifica in qualsiasi contesto di apprendimento, scolastico e non scolastico).

²²A. Negrete, C. Lartigue (2004)

2.2 IL FUMETTO COME STRUMENTO DI DIVULGAZIONE SCIENTIFICA

Come ha sottolineato Jay Hosler, ricercatore allo Juniata College di Huntingdon e fumettista scientifico, veniamo educati nell'idea che i libri con immagini siano adatti ai bambini e crescendo pensiamo a noi stessi con libri sempre più voluminosi e senza immagini; ma la scienza ha bisogno del supporto visivo per essere spiegata, che si tratti di adulti o di bambini.²³

Della bontà dell'uso delle immagini è convinto Giulio Giorello, autore dell'introduzione al graphic novel "Logicomix";²⁴ anche gli studi di antropologia visiva dimostrano il ruolo sempre più preponderante delle immagini nella società occidentale, dove la vita quotidiana risulta sempre più strettamente intrecciata alla loro diffusione. «La diffusione di immagini digitali per la storia dell'umanità, è considerata una vera e propria rivoluzione; se le culture si manifestano visivamente e visivamente sono documentabili è possibile ipotizzare che le modalità di espressione e di registrazione siano necessariamente mutate con il sopraggiungere della nuova tecnologia digitale».²⁵

²³ J.J. Meier (2012)

²⁴ A. Doxiadis, C. H. Papadimistriou (2008)

²⁵ F. Marano (2011)

Se è quindi vero che la scienza ha bisogno del supporto visivo per essere spiegata, il fumetto potrebbe prestarsi molto bene a risolvere questo problema perché rappresenta una sintesi perfetta di testo e immagine, ci "costringe" a comunicare i contenuti in maniera molto più succinta, imponendo molta attenzione alla qualità dell'informazione e del modo in cui la comunichiamo.

Una voce autorevole sull'utilizzo del fumetto in campo scientifico è anche Howard Zimmerman, ex insegnante di scienze ed editore di "The Stuff of Life". Lavora per la casa editrice newyorkese Hill and Wang, realtà che ha creato una vera e propria nicchia nella pubblicazione di graphic novels. «Se c'è mai stato un momento in cui spingere per far diventare la scienza una priorità, quel momento è ora. Non possiamo fare progressi nel curare malattie in una società che evita la scienza» ha dichiarato a proposito del crescente interesse nei confronti dei fumetti scientifici.²⁶

Zimmerman e Mark Schultz²⁷ hanno avuto l'intuizione che nel mercato dei comics sta cambiando anche il livello demografico e le *graphic novels* attraggono ora anche giovani donne non interessate ai fumetti classici. Un fumetto sulla scienza può quindi rappresentare una valida risposta al bisogno di corretta informazione del pubblico, anche al di fuori della scuola. Non a caso "The Stuff of Life" si fonda sull'esperienza di Larry Godnick, fumettista che già negli anni Ottanta aveva

²⁶ B. Harbaugh (2008)

²⁷ B. Harbaugh (2008)

pubblicato, nella serie delle Cartoon Guides, la Cartoon Guide to Genetics, dimostrando che l'interesse verso il fumetto per la comunicazione scientifica non è nuovo.²⁸

Secondo Franco Gambale, fisico del Cnr di Genova e fumettista al notiziario Almanacco della Scienza «si dice che talvolta può valere più un'immagine di milioni di parole. Questo vale ancora di più per il fumetto, genere che piace ai bambini ma stimola anche gli adulti, grazie all'approccio creativo e al potere rilassante che abbassa le 'difese' del lettore anche a fronte di contenuti di una certa complessità»²⁹

Il fumetto, per via della perfetta sinergia tra immagini e testo, e alla popolarità di cui gode tra bambini e ragazzi (ma anche adulti), può rappresentare un valido strumento per raggiungere un pubblico vasto ed eterogeneo; e diventare un aiuto valido all'apprendimento e all'insegnamento delle discipline scientifiche. Rappresenta un notevole supporto per comunicare la scienza in maniera leggera, divertente, pur conservando un suo rigore. Grazie alla loro immediatezza e al loro equilibrio tra testo e immagine, i fumetti sono più facili da leggere, capire e ricordare rispetto ad un classico libro di testo.

Dal punto di vista strutturale, i fumetti riescono ad appassionare perché combinano la spiegazione di fenomeni reali con stratagemmi narrativi, situazioni

²⁸ B. Harbaugh (2008)

²⁹ Almanacco della scienza (2012)

metaforiche e analogie, al fine di agevolare la spiegazione e rendere la lettura accattivante e scorrevole. Questo fa sì che il pubblico abbia l'idea di leggere una storia e non un manuale; storia dalla quale sarà capace di estrarre le nozioni scientifiche che gli interessano.³⁰

Esistono diverse forme di fumetto che possono essere distinte in: giornalino, striscia a fumetti e singola vignetta.

La distinzione formale, fatta dall'American Heritage Dictionary nel 2000, usa i termini 'graphic novel', 'comic strips' e 'cartoons' per distinguere questi tre tipi di fumetti. Secondo questa distinzione un *cartoon* è un singolo disegno, una vignetta singola, che rappresenta una situazione divertente, spesso accompagnata da una didascalia.

Comic strip, la nostra striscia a fumetti, è invece una narrazione solitamente divertente composta da una sequenza di più vignette, all'interno della quale si sviluppa una breve storia attraverso la narrazione, il dialogo di più personaggi o ricorrendo solo all'uso di immagini e simboli.

Il *graphic novel* – quello su cui si basa il fumetto oggetto di questa tesi, "Viaggio nel mondo dei quanti. Le avventure di Alice nel paese delle meraviglie quantistiche" – è invece un vero e proprio libro per immagini e contiene tutti gli elementi di una storia: personaggi, dialoghi, trama, conflitto e climax.³¹

³⁰ M. Tatalovic (2009)

³¹ W. J González-Espada (2003)

La potenza comunicativa di ogni genere di fumetto risiede nel fatto che l'informazione viene raccolta dal nostro cervello principalmente attraverso la vista. Infatti la prima cosa su cui il cervello punta l'attenzione quando apriamo un libro è l'immagine che contiene, ancor meglio se è colorata, come sostiene l'antropologia visiva.

Inoltre il fumetto, in quanto associazione di immagini e parole, mette all'opera una sorta di dualismo, fa lavorare simultaneamente l'emisfero cerebrale destro e sinistro, stimolando maggiormente l'attenzione e la comprensione. Anche per questa ragione l'utilizzo del fumetto a scopi divulgativi e didattici sta diventando una pratica sempre più adottata in vari contesti di apprendimento.

Si può quindi usare la forza comunicativa dell'immagine a fini informativi ed educativi: stimola l'attenzione, la motivazione e facilita la spiegazione e la comprensione introducendo un elemento di divertimento.³²

A parte le ragioni di natura neuroscientifica, un altro motivo per cui il fumetto può essere considerato un ottimo mezzo di comunicazione scientifica è, come è già stato accennato, il vasto "target" che è in grado di raggiungere, sia dal punto di vista dell'età, che della cultura: chiunque si avvicini ai fumetti è in grado di capirne il contenuto. Chi si cimenta nella lettura di un fumetto non parte dall'idea che esso possa essere di difficile lettura, anzi, parte dal presupposto di leggere

³² Bruner (2003)

qualcosa di comprensibile e interessante. Per questa ragione un adulto, mediamente istruito, si sente a proprio agio nella lettura – il che rende il fumetto un potente strumento di sensibilizzazione. Gli adolescenti, che costituiscono il pubblico principale, apprenderanno in maniera intuitiva immagazzinando utili informazioni, mentre per i giovani una storia a fumetti può essere un ottimo strumento che permetta loro di avvicinarsi alle scienze con naturalezza.

Nonostante queste considerazioni, esiste, in realtà, ancora scetticismo nell'ambiente accademico sull'utilizzo del fumetto come mezzo di divulgazione scientifica (giustificato dall'idea che, essendo il fumetto associato all'immagine di lettura divertente, si possa generare una scorretta rappresentazione della scienza). Nonostante ciò negli USA esistono molti esempi pratici di insegnanti che sperimentano questo nuovo metodo di insegnamento, usando fumetti creati *ad hoc* come sussidio all'insegnamento delle discipline scientifiche. Esistono inoltre, in letteratura, articoli che dimostrano come i fumetti siano efficaci non solo nella divulgazione scientifica, ma anche nell'insegnamento delle discipline scientifiche a diversi livelli scolastici³³.

In una scuola americana del Maryland, la Lisby-Hillsdale Elementary School, si è fatta una sperimentazione in tal senso. Ai bambini della scuola è stato proposto il graphic novel "Dignifying Science", il secondo di una serie di libri scritti in forma di fumetto che raccontano la vita di alcune famose scienziate. Le storie contenute

³³ M. Tatalovic (2009)

nel libro offrono un contesto umano che spesso manca quando si studiano le scoperte collegate ai nomi di queste scienziate. Le insegnanti della Lisby-Hillsdale Elementary School hanno elaborato questo tipo di lezioni innovative su richiesta dello State Education Department del Maryland, intenzionato a valutare l'efficacia dei fumetti come supporto all'insegnamento, per decidere se possono essere inseriti nei programmi scolastici nazionali. Il dibattito a riguardo rimane aperto, con genitori e insegnanti divisi tra favorevoli e contrari.³⁴

Ancora: continuando ad esaminare altri progetti simili, vale la pena citare una ricerca³⁵ pubblicata nel 2011, condotta da Jay Hosler e Kyle B. Boomer, dove si propone a degli studenti, con percorsi scolastici non scientifici, un fumetto che illustra e spiega la biologia, dal nome "Optical Allusion", scritto dallo stesso Hosler. Lo scopo era quello di studiare e analizzare se e come il fumetto potesse influenzare l'apprendimento e l'attitudine degli studenti nei confronti della biologia. I ricercatori hanno osservato, attraverso la valutazione della conoscenza della biologia prima e dopo l'utilizzo in classe del fumetto, che si evidenzia una maggiore comprensione della disciplina. Ciò dimostra che il fumetto potrebbe essere uno strumento molto valido per avviare all'utilizzo di un manuale scolastico, con l'aggiunta dell'aspetto positivo di aver aumentato anche la loro motivazione nei confronti della disciplina

³⁴ S. Hughes (2005)

³⁵ J. Hosler, K. B. Boomer (2011).

Il fatto che questa pratica cominci a diffondersi non deve meravigliare perché le due figure di riferimento delle discipline che sembrano così lontane tra loro, ossia il ricercatore e il disegnatore, sono figure che hanno una componente comune decisiva: entrambi fanno largo uso di immaginazione e fantasia, doti indispensabili in ambito artistico ma anche in ambito scientifico, dove risultano essere indispensabili supporti del rigore, che permettono di acquisire un atteggiamento innovativo e ad analizzare e interpretare i risultati ottenuti.

2.3 PANORAMA INTERNAZIONALE E NAZIONALE

Sebbene nel panorama italiano ed internazionale abbondi letteratura di divulgazione della fisica quantistica, è difficile rintracciare testi pensati e scritti per un pubblico di adolescenti.

Il testo che viene di seguito presentato – “Viaggio nel mondo dei quanti. Le avventure di Alice nel paese delle meraviglie quantistiche” – si distingue dalla maggior parte dei racconti o fumetti sull’argomento per due aspetti. È uno dei pochi che combina le due forme espressive, creando, in questo modo, un prodotto le cui due parti hanno una propria autoconsistenza (il fumetto e il racconto hanno in sé una forma compiuta) ma che, uniti insieme, diventano sostegno l’uno dell’altro: il racconto illustrato fornisce una sorta di approfondimento dei concetti espressi nel fumetto, il quale, d’altro canto, può essere letto e compreso senza il suo ausilio. Il racconto, usando l’espedito narrativo del flashback, narra una storia in maniera dettagliata e compiuta, di cui il fumetto rappresenta solo l’antefatto.

Il secondo aspetto, forse il più rilevante, che distingue il progetto, è il fatto di essere stato pensato e realizzato, in prima istanza, per un pubblico di adolescenti. Questo implica la necessità, non trascurabile, di non dare per scontata nessuna

delle conoscenze acquisibili ad un livello di istruzione secondaria, dando di conseguenza molto peso al linguaggio usato per l'illustrazione dei fenomeni.

Tra i pochi esempi, rintracciabili nel panorama italiano, di racconti sulla fisica quantistica, scritti per un pubblico di adolescenti ricordiamo "**Quanti amici. Sulle onde della fisica moderna**" di Stefano Sandrelli. Si tratta di un racconto che ha per protagonisti tre ragazzi, che «scoprono un mondo nuovo e meraviglioso, in cui la luce si comporta in modo strano, lo stesso topolino può trovarsi contemporaneamente in tanti posti diversi e le zie riescono ad attraversare i muri. Con semplici esperimenti e chiacchierate notturne alla luce delle stelle, Camilla e i suoi amici trascinano Anna e Luca alla scoperta dei più affascinanti aspetti della fisica quantistica in un mondo che non ha più certezze ma molte più possibilità.»³⁶

Un altro esempio è: "**C'era un gatto che non c'era. Misteri e meraviglie della fisica quantistica**" di Monica Marelli, un racconto in cui, descrivendo l'incontro con il gatto più famoso della storia della scienza (anche se non è mai esistito), l'autrice racconta che cosa è la fisica quantistica, perché è strana, perché ha "disturbato" la fisica classica e si è indissolubilmente legata con la filosofia e con il concetto di realtà.

La maggior parte dei racconti e dei fumetti sulla divulgazione della fisica quantistica, proprio perché si pone l'obiettivo di spiegare i fenomeni, non può

³⁶ S. Sandrelli (2012)

fare a meno di considerare come “presupposte” le nozioni di fisica che si acquisiscono, generalmente, durante gli ultimi anni di istruzione secondaria.

È il caso di testi come “**Entanglement**” di A. Aczel, “**Alice nel paese dei quanti**” di R. Gilmore o il fumetto “**Un pensiero abbagliante. Neils Bohr e la fisica dei quanti**” di Jim Ottaviani.

Sono stati citati i lavori che, per argomento e struttura narrativa, più si avvicinano al presente progetto; è possibile allo stesso tempo, notare come implicino delle conoscenze di fisica che un ragazzo, di norma, non possiede.

Se consideriamo come esempio la spiegazione del modello atomico di Bohr, la descrizione presente nel libro “Entanglement” è la seguente: «La scoperta rivoluzionaria di Bohr consisteva nell’aver mostrato che era impossibile descrivere l’atomo in termini di fisica classica. I suoi sforzi si indirizzarono da principio alla comprensione del più semplice tra tutti gli atomi, quello di idrogeno. All’epoca i fisici erano a conoscenza dell’esistenza di specifiche serie di frequenze alle quali l’atomo di idrogeno emette radiazioni. Sono celebri le serie di Rydberg, Balmer, Lyman, Paschen e Brackett – ognuna posizionata in una diversa parte dello spettro della radiazione di un atomo di idrogeno eccitato: dagli ultravioletti, alla luce visibile, all’infrarosso». ³⁷ È facile notare come l’autore dia per scontata la conoscenza di numerosi concetti di fisica: innanzitutto l’idea di atomo, il modello

³⁷ A. D. Aczel (2004)

atomico precedente a quello proposto da Bohr, il concetto di frequenza, radiazione, spettro, luce e ultravioletto, solo per ricordare i più rilevanti.

Discorso analogo vale per il fumetto di Ottaviani, dove, si legge: «[Bohr]: [...] questo portò all'idea di "atomo nucleare", anche se Rutherford non usò la parola nucleo fino al 1912. In questo atomo gli elettroni schizzano intorno a un nucleo piccolo e denso, che può essere urtato da una particella alfa. Però come fanno gli scienziati grazie a Maxwell, cariche elettriche in movimento irradiano energia. Dunque, se davvero gli elettroni orbitassero intorno al nucleo, irradierebbero di continuo energia. Così, cedendo energia, cadrebbero man mano in orbite più interne. Allora perché dopo un po' gli atomi non collassano in una cosa tipo il panettone o il cocomero di J.J.?»³⁸

Tenendo presente questa differenza, possiamo passare ad analizzare la letteratura di divulgazione scientifica a mezzo fumetto.

Nel panorama americano, il progetto editoriale che si distingue per forma e contenuto è senza dubbio "**G.T. Labs – Comics about scientist? What a dangerous experiment!**". Interessante e ben fatto, sintetizza bene l'abbinamento tra scienza e fumetti. Numerose e molto variegata le sue pubblicazioni, biografie (che percorrono le vite e le mirabolanti imprese di Feynman, Oppenheimer, Bohr, Marie Curie, Galileo ecc.) e libri a tema. Suggerisce inoltre, una guida per gli insegnanti che riguarda non solo ricezione dei contenuti, ma anche i personaggi

³⁸ J. Ottaviani (2007)

e la struttura della narrazione, con una accurata riflessione sulla comunicazione e molta chiarezza sulle fonti.

Per quanto riguarda la produzione editoriale l'elenco è quasi senza fine; si propone, pertanto, una selezione dei lavori per originalità e argomento trattato.

"The Stuff of Life: A Graphic Guide to Genetics and DNA" è un fumetto sulla storia della genetica scritto da Mark Schultz. Diciamocela tutta: le basi della genetica possono sembrare cose dell'altro mondo. Quindi chi può spiegarle meglio di un alieno? Ecco quindi Bloort 183, uno scienziato di una razza aliena minacciata da una grave malattia, incaricato di ricercare i fondamenti del DNA umano. Usando un linguaggio chiaro e semplice, Mark Schultz, fornisce un'introduzione completa alla genetica e alla sua storia, facile da capire e divertente da leggere.

Esistono diverse opere a fumetti di autori esteri, tradotte per il pubblico italiano. Al momento, il mondo della scuola non ha ancora considerato la possibilità di usarli come supporto all'insegnamento delle discipline scientifiche, anche se gli esempi di ASI e CNR fanno sperare in una loro riconsiderazione come mezzo accessorio per l'insegnamento.

Tra gli autori più quotati ricordiamo Jim Ottaviani; sono stati tradotti due suoi lavori che hanno per protagonisti due personaggi che hanno fatto la storia della scienza: **"Richard Feynman"** e **"Un pensiero abbagliante, Neils Bohr e la fisica dei quanti"**.

Un aneddoto curioso: difficile da credere ma la disputa infinita tra scienziati-evoluzionisti e cristiani anti-Darwin si combatte anche attraverso i fumetti. Jim Ottaviani ha trovato ulteriore motivazione nel suo lavoro dopo essersi scontrato con Jack T. Chick, fumettista cristiano anti-evoluzionista. I materiali di Chick sono un incredibile e inquietante successo editoriale, e sono stati utilizzati per alimentare il movimento creazionista negli Stati Uniti.

Abbiamo poi "**Logicomix**", un graphic novel in cui logica, matematica e filosofia, sono state messe insieme in un romanzo a fumetti, sulla vita del grande intellettuale gallese Bertrand Russell. Tradotto per le edizioni Guanda nella serie Graphic, si presenta come un volume a colori ad opera di due studiosi greci, il matematico Apostolos Doxiadis e l'informatico Christos Papadimitriou, del cartoonist Alecos Papadatos e della grafica francese Annie Di Donna. L'introduzione all'edizione italiana è a cura di Giulio Giorello.

Logicomix segna un nuovo traguardo per il graphic novel come forma d'arte e strumento di divulgazione. La logica, la matematica e la filosofia non sono mai apparse così affascinanti ed emozionanti.

"**La statistica a fumetti**", con l'aiuto delle illustrazioni di Borin Van Loon, Eileen Magnello racconta la storia e le utilizzazioni pratiche della statistica, invitando il lettore a un viaggio ricco di sorprese e al tempo stesso di importanza fondamentale per comprendere il nostro mondo.

Alla stessa collana appartengono: "**L'evoluzione a fumetti**" di Evans Dylan e Selina Howard, "**La relatività a fumetti**" di Bassett Bruce e Edney Ralph, "**La logica a fumetti**" di Cryan Dan, Shatil Sharron e Mayblin Bill, "**I frattali a fumetti**" di Lesmoir-Gordon Nigel, Rood Will e Edney Ralph e "**Il tempo a fumetti**" di Callender Craig e Edney Ralph.

Jean pierre Petit è autore di una vera e propria opera omnia, "**La scienza a fumetti**", che comprende i seguenti volumi: "Informagica", "Cosa pensano i robot?", "Il volo", "Tutto è relativo", "L'inflazione", "Il muro del silenzio", "Il geometrico", "Il big bang" e "I buchi neri".

Per quanto riguarda il panorama italiano si è già accennato al fatto che la scuola fatica a considerare il fumetto come valido strumento per l'apprendimento. Naturalmente esistono le eccezioni, sono presenti infatti alcune pubblicazioni a fumetti interamente pensate e progettate in Italia e create come sussidi didattici, per facilitare l'apprendimento di argomenti di natura scientifica, considerati "difficili" per gli studenti. Esattamente come lo è stata per la divulgazione scientifica in generale, anche nel campo dei nuovi mezzi di divulgazione scientifica, pioniera risulta l'astronomia.

L'ASI (Agenzia Spaziale Italiana) ha creato, infatti, una collana di tre volumi: "Extraterrestri. Gli Astronauti e la Stazione Spaziale Internazionale", "Terra! Il mondo visto dallo Spazio" e "Astroparticelle. Una materia molto oscura"

Questo interessante progetto editoriale è uno strumento leggero nella forma, ma rigoroso e ricco nel contenuto, ideato per catturare l'attenzione dei più giovani attraverso testi piacevoli nella lettura. I tre volumi sono dotati di informazioni accurate e corredati da disegni e caricature di personaggi, eventi e situazioni reali, scritti e disegnati da autori italiani. La fruizione e l'apprendimento dei concetti teorici esposti risulta, in tal modo, agevole per la generalità dei lettori.

A questo proposito è da notare che la NASA (National Aeronautics and Space Administration) è sempre stata attenta all'aspetto divulgativo delle proprie attività. Si deve a questa agenzia la creazione di un personaggio, Cindi, che spiega, attraverso le tavole a fumetti, spazio e tecnologie spaziali agli studenti delle scuole elementari e medie.³⁹

Il fatto che entrambe le agenzie spaziali abbiano realizzato progetti di questo tipo dimostra innanzitutto attenzione verso le nuove generazioni; nonché la consapevolezza che l'astrofisica è un campo cognitivo molto affascinante per il pubblico, ma non facile da acquisire.

In ambito italiano si possono citare inoltre: "**Global warming**", fumetti indipendenti contro il riscaldamento globale (Nda edizioni), "**Maccheariachefa**" fumetti e satira in difesa dell'ambiente (Aboca) e "**Viva la scienza**" di Antonio Mingote e Jose' Manuel Sanchez Ron (Edizioni Dedalo), racconto che spazia dalla fisica alla matematica, passando per la chimica e la biologia.

³⁹ Comicom (2012, feb. 21)

"**Ultima lezione a Gottinga**", di Davide Osenda, ricostruisce invece una storia ambientata in Germania durante la dittatura nazista, dove un vecchio professore ebreo ed un giovane uomo discutono della teoria dell'infinito di Cantor. È stato presentato al Festival della Matematica a Roma nel 2008.

Il famoso fumettista Leo Ortolani, creatore del personaggio Rat Man, parodia dei supereroi americani, ha disegnato di recente un fumetto dedicato a tematiche scientifiche. Si tratta di "**Misterius – Speciale Scienza!**", contenuto nella nuova rivista Comics & Science promossa dal CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) per richiamare l'attenzione del pubblico verso la scienza, ma in modo nuovo e utilizzando mezzi alternativi che facilitino la divulgazione di questo tipo di informazioni. La rivista è stata presentata al Festival della Scienza di Genova del 2013.⁴⁰

Infine c'è "Editoriale scienza", una casa editrice specializzata in divulgazione scientifica per ragazzi; un punto di riferimento nel panorama editoriale italiano. Numerose le collane pubblicate, tra cui "**1,2,3 Raccontami una storia**", "**A tutta scienza**", "**Apprendisti scienziati**", "**Bellodasapere**" e "**Donne nella scienza**".

Per quanto riguarda la divulgazione sotto forma di racconto, ci limiteremo all'ambito della sola fisica quantistica, citando alcuni dei lavori più rilevanti. La casa *Raffaello Cortina Editore*, all'interno della collana "Scienza e idee", diretta da Giulio Giorello, ha pubblicato testi come "**Entanglement**" di Amir Aczel, una

⁴⁰ Ortolani L. (2013, ott. 10).

narrazione che conduce il lettore alla scoperta dell'entanglement, proprietà contro intuitiva ma che è una caratteristica ineliminabile della teoria della fisica quantistica.

Abbiamo poi **"La realtà non è come ci appare"** di Carlo Rovelli, un'indagine sui fondamenti delle scienze naturali svolta in modo semplice e avvincente. L'autore disegna un vasto affresco della visione fisica del mondo, chiarisce il contenuto di teorie come la relatività generale e la meccanica quantistica, ci porta al bordo del sapere attuale e offre una versione originale e articolata delle principali questioni oggi aperte.

Ricordiamo, di nuovo il più volte citato **"Alice nel paese dei quanti. Le avventure della fisica"** di R. Gilmore.

David Darling è autore del libro **"Teletrasporto: il salto impossibile"** in cui si riprende l'idea del teletrasporto della famosa serie "Star Trek", per analizzare le incredibili possibilità che forse avremo a disposizione nei prossimi decenni. Darling racconta i principali esperimenti e scoperte che hanno fatto progredire la scienza delle correlazioni quantistiche, concentrandosi in particolare su due grandi linee di ricerca, la crittografia quantistica e i computer quantistici, che come il teletrasporto, sono aspetti del fenomeno dell'entanglement.

Ancora: **"Fisica. Una storia illustrata dei fondamenti della scienza"** di Tom Jackson, edito da Rizzoli, contiene cento racconti che narrano le riflessioni e le azioni di grandi pensatori. Ciascuna storia ha al centro un oscuro enigma che si è

poi trasformato in una scoperta capace di cambiare il modo in cui vediamo il mondo. Tra le storie raccontate c'è quella di Richard Feynman, che si dice, capì il comportamento delle particelle subatomiche guardando un piatto messo in rotazione da uno studente.

Infine per Einaudi c'è "**Fisica quantistica della vita quotidiana**" di Piergiorgio Paterlini, una raccolta di romanzi microscopici, centouno racconti brevi o brevissimi, che giocano con i generi letterari - dal giallo al romanzo d'amore, dalla denuncia sociale alla fantascienza - ma soprattutto con il lettore. Microromanzi che raccontano della più grande rivoluzione scientifica di tutti i tempi, la fisica quantistica che ha già cambiato la filosofia, la religione e la nostra comprensione del mondo.

2.4 LA SCELTA DELLA STORIA

Ho scelto di partire da una storia già scritta – Le avventure di Alice nel paese delle meraviglie di Lewis Carroll – rielaborandola nel modo più appropriato, perché avere a che fare con un racconto già noto al lettore facilità l'apprendimento.

Una storia così strutturata suscita una spontanea metodologia di apprendimento. I ragazzi, attraverso le avventure di un personaggio a loro familiare, accettano con più facilità anche lo 'sforzo' della comprensione del contenuto e mettono in evidenza le loro risorse personali, trasformandole in competenze didattico/disciplinari.

La scelta di ispirare il racconto al libro di Carroll è dovuta alla forte analogia che è possibile riscontrare, agli occhi di un adolescente, tra il paese delle meraviglie e il paese dei quanti. In entrambi i mondi vigono delle regole e dei principi logici molto lontani da quelli ai quali l'esperienza quotidiana ci ha abituati.

Già dal primo corso seguito durante il mio curriculum di studi, sui fondamenti della fisica quantistica, ho immaginato di scrivere un libro con protagonista la simpatica Alice che compie una seconda avventura. Subito dopo ho scoperto che il libro era già esistente, "Alice nel paese dei quanti. Le avventure della fisica" di David Gilmore. Ho usato due scenari presenti nel libro di Gilmore: l'Istituto di Meccanica quantistica e la scuola Niels Bohr, (che corrispondono a due capitoli

del libro) in quanto mi sono sembrate potenti metafore che spiegano il ruolo
distinto e separato della descrizione dei fenomeni e della loro interpretazione.

2.4.1 I PROTAGONISTI

- **Alice.** Tutti i ragazzi conoscono Alice, la bambina che, spinta dalla sua immensa curiosità, finisce in un modo fantastico, popolato da strani personaggi, dove vigono delle regole molto particolari.

Per rendere la protagonista più vicina al target cui faccio riferimento, ho deciso, però, di renderla un po' più grande di età rispetto alla storia originale, un po' come nel film di Tim Burton, *Alice in wonderland*.

La protagonista delle avventure nel mondo dei quanti è una teen-ager. Per questa ragione non indossa il vestito e il grembiolino, ma leggings e scarpe da tennis.

Infine, i tratti del volto di Alice sono un omaggio alla collega e amica dott.ssa Luciana De Rose, che, durante tutto il percorso di studi, mi è stata di notevole sostegno e aiuto.

Gli altri protagonisti⁴¹, in ordine di apparizione, sono:

- **Il Bianconiglio.** Esattamente come nel romanzo di Carrol, è un coniglio col panciotto che va di fretta (più in là nel fumetto si scopre che non voleva

⁴¹ L'elettrone e gli scenari dell'Istituto di meccanica e dell'Istituto Niels Bohr sono tratti dal libro *Alice nel paese dei quanti. Le avventure della fisica* di David Gilmore, rivisti e rielaborati.

fare tardi al processo). Permetterà involontariamente ad Alice di scoprire l'effetto tunnel quantistico.

- **L'elettrone.** È il primo personaggio che Alice incontra nel mondo dei quanti: la metterà a parte del fatto che vige una regola in quel mondo: "tanto meno spazio occupi, tanto più veloce ti devi muovere", prima esperienza di Alice col principio di indeterminazione.
- **Gli operai che costruiscono la casa.** Sono due personaggi che stanno ricostruendo la casa del Bianconiglio; nel fumetto si fa riferimento alla precedente avventura di Alice che, dopo aver mangiato il fungo in casa del Bianconiglio, è cresciuta talmente tanto da distruggere la casa. Gli operai quantistici però usano le regole del loro mondo, non seguono un progetto preciso ma calcolano la probabilità.
- **Lo Schröghatto.** È il famoso gatto di Schrödinger, vittima dell'esperimento mentale che lo vuole in una sovrapposizione di stati, vivo e morto, e quindi una versione riadattata del *Cheshire Cat* (Stregatto nella traduzione italiana) del romanzo di Carroll. Informerà Alice della sua particolare condizione, rimandandola, per ulteriori chiarimenti, all'Istituto di Meccanica.

- **Meccanico Classico.** Colui che darà spiegazioni dettagliate ad Alice su alcuni fenomeni della fisica quantistica. Le illustrerà in particolare l'esperimento della doppia fenditura. Ha i tratti del prof. Giovanni Falcone dell'Università della Calabria

- **Meccanico quantistico.** Alice lo vede giocare a biliardo. I suoi tiri, che sembrano completamente casuali e sordinati sono efficaci almeno quanto i precisissimi lanci del meccanico classico. Ha i tratti del dott. Francesco Plastina, ricercatore dell'Università della Calabria

- **Niels Bohr.** Direttore dell'Istituto che porta il suo nome, inviterà Alice ad assistere alle relazioni sulle interpretazioni della Meccanica quantistica

- **Scienziato 1.** È lo scienziato che sostiene la teoria della decoerenza. Ha i tratti del dott. Tony Apollaro, dell'Università della Calabria

- **Scienziato 2.** Scienziato che illustra la teoria dei molti mondi. Omaggio al compianto prof. Mauro Francaviglia.

- **Scienziato 3.** Lo scienziato enuncia la teoria delle variabili nascoste. I tratti sono del prof. Franco Piperno, docente dell'Università della Calabria
- **Albert Einstein.** Personaggio che non ha bisogno di introduzioni. Si trova coinvolto nel processo che accusa la meccanica quantistica di essere una teoria incompleta. Spiegherà ad Alice il fenomeno dell'entanglement

2.5 L'OBBIETTIVO DEL RACCONTO

Partendo dal presupposto gli adolescenti in età di prima scolarità non abbiano probabilmente neanche idea di cosa sia la fisica quantistica, ho cercato, attraverso l'uso di un mezzo di comunicazione appropriato in base all'età, al livello di apprendimento e alla propensione verso le tematiche trattate, di introdurre i ragazzi della scuola secondaria di primo grado, verso la consapevolezza dell'esistenza della fisica quantistica, e, come obiettivo secondario, cercare di spiegare, attraverso situazioni metaforiche, i principi fondamentali della disciplina.

Obiettivo del lavoro non è quindi la spiegazione del "perché" dell'esistenza di alcuni fenomeni – a questo proposito basta ricordare che anche Richard Feynman sosteneva che nessuno capisce a pieno la meccanica quantistica – quanto piuttosto informare "che" esistono questi fenomeni.

«Proprio perché il comportamento atomico è così diverso dalla comune esperienza, è assai difficile abituarcisi, ed esso appare strano e misterioso a chiunque, sia al principiante che al fisico ormai sperimentato. Perfino gli esperti non lo capiscono nel modo che essi desidererebbero, ed è assai ragionevole che

non ci riescano, poiché tutto quanto riguarda la diretta esperienza e l'intuizione umana si riferisce ad oggetti grandi»⁴².

⁴² R. Feynman (1964)

2.6 ILLUSTRAZIONI, GRAFICA E DISTRIBUZIONE

Per quanto riguarda il progetto grafico nel suo insieme – l'unione di fumetto e libro, la proporzione tra testo e immagini, gli elementi ricorrenti nella pagine, gli inserti e la scelta dei colori – volevo che il risultato fosse allo stesso tempo interessante, semplice ed esplicativo. L'obiettivo primario della progettazione grafica è infatti la semplicità: comunicare pochi concetti ma con rigore, senza la pretesa che siano completi di tutte le informazioni necessarie, ma volte a provocare curiosità nei lettori.

Per questa ragione è stato usato il formato di stampa A4, classico e maneggevole, che permette una maggiore fruibilità delle immagini e dei contenuti, rispetto ai formati più piccoli. I disegni del fumetto sono semplici e vicini allo stile dei fumetti della Marvel Comics, casa editrice statunitense di proprietà della Marvel Entertainment e una delle principali compagnie d'intrattenimento al mondo fondate sui personaggi dei fumetti. I testi, molto semplici e caratterizzanti ogni vignetta, sono stati scritti per le immagini e vogliono accompagnarle, non offuscarle. I colori usati non sono accesi ma simili, per intensità, ai colori a matita tradizionali.

Per quanto riguarda la progettazione del racconto, in relazione alla scelta del font, le regole di buona tipografia ne prevedono l'utilizzo di due al massimo, così ho

optato, nel testo principale, per un carattere senza grazie e tondeggiante, che fornisce una resa pulita e molto leggibile rispetto ai caratteri con grazie; per il testo secondario, cioè gli inserti, è stato usato un carattere senza grazie, come nel testo principale, ma più stretto, che richiama i caratteri usati su giornali e riviste.

Le illustrazioni del libro sono state realizzate da Danilo Sirianni, disegnatore e sceneggiatore del web comic interattivo "ZED".

Il prodotto editoriale verrà distribuito da Massimo Bonasorte Editore, casa editrice svedese che si occupa di divulgazione scientifica, con sede a Goteborg.

È stato inoltre proposto – inserito in un progetto più ampio e articolato – in alcune scuole secondarie di primo grado della provincia di Cosenza, nell'ambito dei P.O.F. (Piano dell'Offerta Formativa), per l'anno scolastico 2014/15.

CAPITOLO 3

METODOLOGIA E STRATEGIE DIDATTICHE

3.1 METODOLOGIA E STRATEGIE DIDATTICHE

Al pari delle altre attività didattiche – si pensi alla musica – anche quelle scientifiche si apprendono meglio se praticate fin dall'adolescenza. I ragazzi, infatti, hanno naturalmente un atteggiamento "scientifico", vogliono conoscere il "che cosa", il "come" e il "perché" del mondo che li circonda, le tre domande alla base dello sviluppo della conoscenza scientifica.

Le giovani generazioni problematizzano oggetti, eventi e situazioni del mondo fisico, elaborano mentalmente componenti dell'ambiente fisico e sociale, producendo strumenti cognitivi mediante i quali sono in grado di "ricostruire" la realtà. Molte attività, che normalmente già si svolgono con i ragazzi, hanno forti componenti e caratterizzazioni scientifiche: si tratta solo di coglierle, sfruttarle e svilupparle. Inoltre lo sviluppo delle conoscenze e dei modi di procedere tipici della scienza facilitano lo sviluppo armonico dell'intelligenza, tanto nell'intuizione quanto nel ragionamento.

Sono questi una serie di buoni motivi per facilitare gli adolescenti nel loro avvicinarsi alla fisica quantistica. Con adeguate strategie didattiche risulterà inoltre molto più semplice di quanto si possa pensare, per un adolescente accostarsi alla fisica quantistica rispetto ad un adulto di formazione non scientifica. Un adolescente è quasi completamente libero da schemi di pensiero precostituiti e preconetti, anche se condizionato dal senso comune e dalla comune esperienza. Questo fa sì che possa accettare le "stranezze" della disciplina molto più facilmente, rispetto ad un adulto.

Nella progettazione e nella stesura del presente lavoro sono state adottate opportune strategie didattiche rispetto al "come" veicolare nel migliore dei modi l'informazione scientifica. Non dimenticando che, come sostiene il filosofo e pedagogo Giovanni Amos Comenio, "la didattica è l'arte dell'insegnare"⁴³, nel contesto specifico assume il significato traslato dell'arte dell'informare. Le strategie didattiche adottate sono: similitudini analogie e metafore, le mappe concettuali, imaging e lo sfondo integratore.

⁴³ J. A. Komenský, *Didactica Magna*, (1658)

3.2 SIMILITUDINI, ANALOGIE, METAFORE

Il ricorso alle figure retoriche, analogie, similitudini e situazioni metaforiche – in un contesto di divulgazione della fisica quantistica, soprattutto se pensata in primo luogo per adolescenti – risulta imprescindibile, proprio perché si ha a che fare con sistemi logici, equazioni e ordini di grandezza, che non sono alla portata e non rientrano nell'esperienza di un adolescente. La trasmissione della conoscenza, non potendo ricorrere all'esperienza, avviene tramite il discorso e le figure retoriche.

Come scrive Burke, «La metafora è uno strumento che permette di vedere qualcosa in termini di qualcos'altro»⁴⁴. La potenza di una metafora, di una similitudine o un'analogia deriva dal fatto che forniscono un'immagine: sono più spontanee che un'astrazione e consentono al ragazzo di farsi un'idea dell'oggetto in questione. In generale, le figure retoriche sono rappresentazioni sociali importantissime perché, come dei ponti, consentono di inserire le novità nell'universo cognitivo della società;

Queste figure retoriche assumono il ruolo di strumento cognitivo 'facilitatore' di comprensione dell'ignoto a partire da ciò che è noto, permettendo di veicolare

⁴⁴ K. Burke (1945)

nuove informazioni a partire dalle informazioni che già possediamo e conosciamo e dalle relazioni tra le informazioni stesse.

La metafora aiuta nella divulgazione di argomenti di fisica quantistica, permette di illustrare "qualcosa per qualcos'altro" senza corromperne il significato, aiuta a spiegare concetti che siano allo stesso tempo significativi per il pubblico e che abbiano un effettivo valore euristico generando quella gratificazione psichica che accompagna la comprensione.

Alla base vi è quindi la convinzione che l'approccio metaforico sia in grado di effettuare buona divulgazione scientifica per adolescenti, generando dei significati disciplinari validi, nuovi per il pubblico generico, veicolandoli linguisticamente dalle informazioni pregresse già a disposizione dei ragazzi stessi. Informazioni note, conoscenze pregresse, che si ritiene siano appartenenti al sistema concettuale ordinario e quindi esprimibili secondo il linguaggio ordinario, ovvero il senso comune.

La situazione metaforica, l'analogia o la similitudine possono generare nuovi modi di vedere le cose diventando uno strumento cognitivo che orienta la nostra percezione del mondo. Emerge così il ruolo delle figure retoriche, generatori di nuove conoscenze a partire da quelle pregresse, capaci di nominare nuove categorie attraverso oggetti che sono preliminarmente noti e riferiti ad altre categorizzazioni.

Vale la pena analizzare meglio la questione del ruolo della metafora come 'facilitatore' anche del processo di apprendimento, di acquisizione e strutturazione di nuove conoscenze. Alcune delle riflessioni che riguardano il ruolo della metafora in contesti didattici possano essere plausibilmente estese al contesto divulgativo; si tratta, infatti, in entrambi i casi, di un uso metaforico legato all'introduzione di concetti per cui mancano sufficienti conoscenze pregresse formali. Quest'ultimo aspetto rappresenta proprio uno dei punti in comune tra le teorie dell'apprendimento e la prospettiva cognitiva della metafora all'interno della linguistica cognitiva. Secondo alcuni autori, infatti, alla base dei processi di apprendimento vi è la visione di «una strutturazione non rigida delle conoscenze, che non sono organizzate e trattate in riferimento a regole, ma secondo schemi dinamici e flessibili. Questi modelli quindi non sono fissi, ma al contrario sono modificabili, secondo diverse modalità: sono estendibili, ampliabili e soprattutto, in relazione ai nostri interessi, sono 'trasferibili' tra vari domini.»⁴⁵

L'idea di base è che sia possibile individuare somiglianze tra schemi, contesti e strutture. L'apprendimento di conoscenze, in questa prospettiva, non è inteso quindi come procedurale; è piuttosto il risultato di un processo di metacognizione, all'interno del quale la stessa conoscenza diventa uno strumento per produrne di nuova. L'apprendimento, quindi, ha un doppio significato: da una parte, vuol dire essere capaci di organizzare e strutturare le conoscenze che si

⁴⁵ A. Karmiloff-Smith, (1995)

posseggono collegandole in un sistema coerente; dall'altro significa riuscire a ricondurre il nuovo al noto costruendo legami con l'esterno.

Come già anticipato all'inizio del paragrafo, le figure retoriche diventano strumenti imprescindibili all'interno di un contesto di divulgazione di fisica quantistica. Ne hanno fatto largo uso anche gli scienziati che, di fronte alla evidente difficoltà di illustrare e spiegare i risultati ottenuti, hanno fatto ricorso a situazioni metaforiche, analogie e similitudini. Il *Gedanken Experiment*, ovvero "il paradosso Gatto di Schrödinger" è forse l'esempio che è rimasto più famoso nella storia. Ma non è l'unico.

3.3 SFONDO INTEGRATORE

In entrambe le parti di questo saggio, fumetto e racconto, è presente uno sfondo integratore, rappresentato da Alice e dal viaggio che ha compiuto nel mondo dei quanti.

La metafora del dipinto rende l'idea dello sfondo: lo sfondo di un dipinto è utilizzato per far risaltare le figure in primo piano. Se varia lo sfondo varia anche la percezione delle figure e il significato a loro attribuito. Una metodologia didattica che usi lo sfondo integratore sceglie quindi un "contenitore di significati" che può essere fisico (uno spazio, un ambiente) o mentale (una storia, una narrazione o altro). Lo sfondo in altre parole è un quadro di riferimento motivazionale, uno strumento che organizza il contesto educativo. Il ruolo dell'adulto, in questo contesto, è quello di regista educativo. «Separate da un contesto, le nostre azioni, come le nostre parole, sono prive di senso.»⁴⁶

Mette conto ricordare alcuni aspetti del concetto di "sfondo integratore", dal momento che, nel presente lavoro, è utilizzato come strategia didattica, mediatore, facilitatore della divulgazione scientifica.

⁴⁶ G. Bateson (1972), in Zanelli (1986)

Da una breve analisi diacronica nell'ambito pedagogico-didattico, lo sfondo integratore risulta essere una metodologia didattica entrata a far parte del patrimonio pedagogico contemporaneo. Nasce in Italia negli anni 80 presso l'Università di Bologna, ad opera di Canevaro e Zanelli⁴⁷. In un primo momento è rivolta all'integrazione dei bambini portatori di handicap, attualmente invece si utilizza nei programmi curriculari e in tutti i settori scolastici.

Nella storia della pedagogia si possono individuare, retrospettivamente, tre diverse forme fenomenologiche che ha assunto, a partire dalla seconda metà degli anni 80, il concetto di sfondo integratore.

- a) Sfondo integratore come sfondo istituzionale. Consiste nell'organizzazione degli elementi dell'ambiente (soprattutto spazi, materiali, tempi) e nell'utilizzo di elementi mediatori o organizzatori delle attività (in linea con la pedagogia istituzionale).⁴⁸
- b) Sfondo integratore come struttura di connessione narrativa. Consiste nell'utilizzo della dimensione narrativa per costruire situazioni di condivisione di significati fra i bambini e fra gruppi di bambini e adulti.⁴⁹
- c) Sfondo integratore come sfondo metaforico. Si tratta di uno specifico strumento didattico (influenzato, in parte, dalla pratica e dalla prospettiva terapeutica di Milton Erickson⁵⁰), pensato per favorire l'integrazione di

⁴⁷ Zanelli (1983)

⁴⁸ G. Lippi (1999)

⁴⁹ I. Benzoni (2000)

⁵⁰ I. Benzoni (2000)

bambini con problematiche comunicative e con forme di psicosi lievi. Consiste, praticamente, nel proiettare la situazione problematica su di uno sfondo metaforico che, da una parte, ripropone gli elementi del problema, ma, dall'altra, introduce nuovi elementi che consentono al bambino (e al gruppo classe) di ristrutturare la situazione problematica e di farla evolvere.⁵¹

La strategia dello sfondo integratore si basa sui risultati della Teoria della Gestalt e della Teoria Sistemica della Comunicazione.

La Teoria della Gestalt nasce come studio della percezione sensoriale per poi approdare ad un modello teorico più generale: parte dall'assunto che ogni percezione si presenta all'esperienza come un tutto unico, non risolvibile in una somma di componenti giustapposti perché i singoli elementi, organizzandosi nelle strutture definitive, si modificano reciprocamente assumendo una forma (in tedesco Gestalt) determinata. Ogni elemento viene percepito in relazione con il tutto; e solo nel tutto assume significato.

L'esperienza del soggetto quindi non è mero associare parti percepite singolarmente, come se si trattasse di una somma aritmetica, è un cogliere la realtà come totalità strutturata, come una simultaneità degli eventi tutti insieme

⁵¹ V. Severi, P. Zanelli (1990)

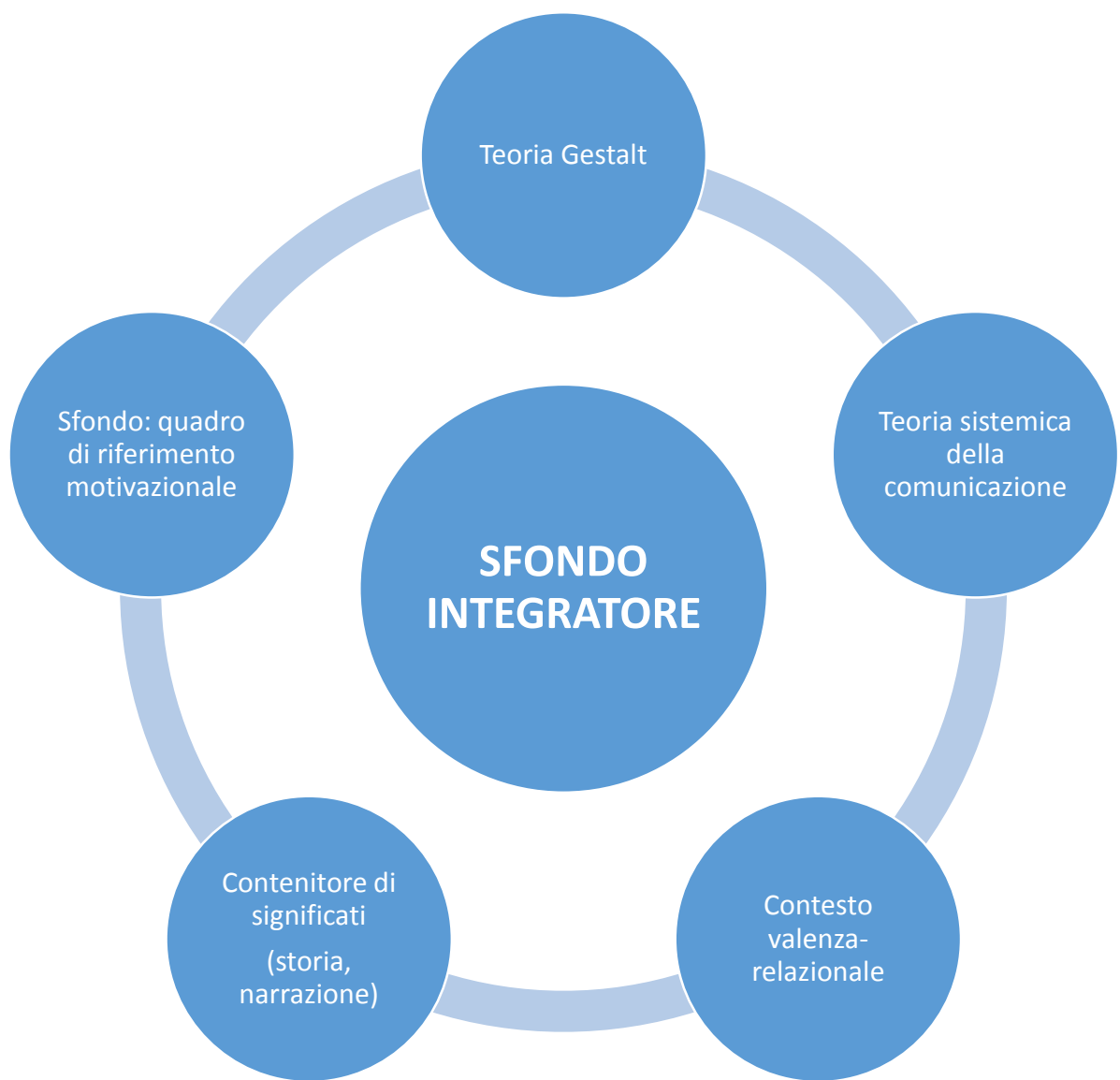
alla volta, elementi che solo mediante operazioni analitiche successive possono essere esaminati singolarmente.

L'idea di "sfondo integratore" presente, invece, nella teoria sistemica della comunicazione, si basa sull'assunto che il contenuto di una comunicazione è inscindibile dalla relazione esistente tra le persone comunicanti, che a sua volta assume pieno significato solamente in un contesto di riferimento. Dal punto di vista più strettamente pedagogico, l'idea di sfondo integratore è sostenuta dall'idea dello psicanalista Donald Woods Winnicot secondo il quale «l'apprendimento non accade se non in un ambiente investito di affettività da parte dei soggetti impegnati nella relazione».⁵²

Secondo la Teoria sistemica della comunicazione dunque, il contenuto di una comunicazione e la relazione tra gli attori assumono significato nell'ambito di un contesto⁵³.

⁵² N. Barbieri (2004)

⁵³ Schmidt, 1990



3.4 MAPPA CONCETTUALE

La mappa concettuale è un efficace strumento grafico per rappresentare informazione e conoscenza, teorizzato da Joseph Novak negli anni settanta⁵⁴. Le mappe servono per rappresentare in un grafico le conoscenze intorno ad un argomento specifico secondo un principio cognitivo di tipo, per così dire, costruttivista; e mirano a contribuire alla realizzazione di "apprendimento significativo", in grado cioè di modificare davvero le strutture cognitive del soggetto in contrapposizione all'"apprendimento meccanico", che si fonda sull'acquisizione mnemonica passiva.

La mappa concettuale non è un semplice elenco di contenuti, ma un organizzatore di concetti, che offre, ben chiari, i punti di riferimento fondamentali, facilmente riconoscibili; mette in evidenza le relazioni e le conseguenze logiche del concetto in studio, possibilmente individuando, come centrale, un unico aspetto e concatenando ad esso gli altri; individua relazioni di ordine, subordinate, livelli e sequenze e contiene le connessioni con altri concetti che precedono o seguono.

Partendo da una mappa concettuale strutturata in questo modo si può iniziare con l'aspetto considerato centrale e ben riconoscibile per poi individuare e legare

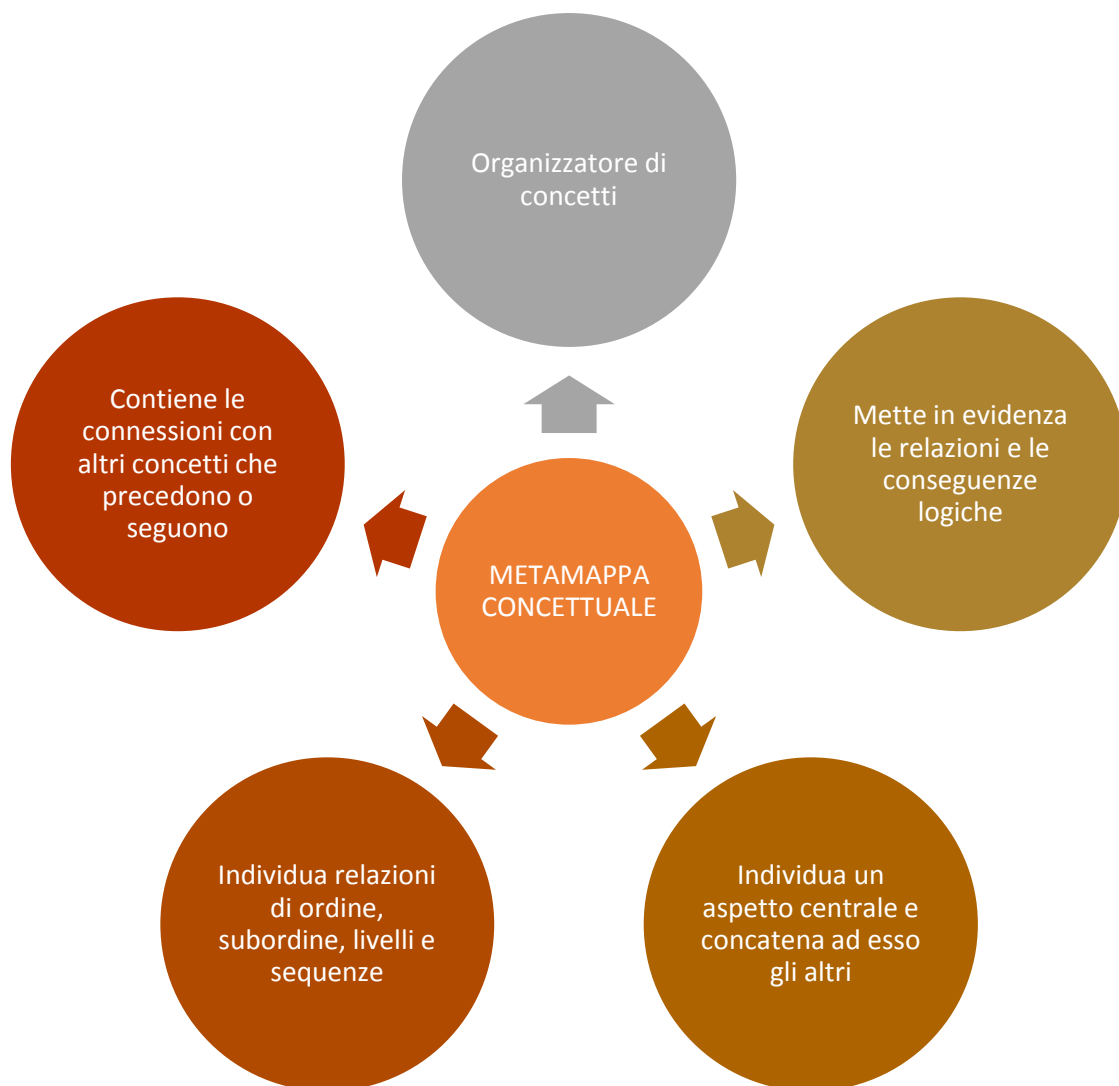
⁵⁴ J.D Novak (2001)

ad esso gli altri aspetti. Successivamente si cercano poi le connessioni con altri concetti.

Ogni capitolo del libro contiene due mappe concettuali, che hanno una diversa valenza in quanto collocate una all'inizio e l'altra a fine capitolo.

La mappa presente alla fine, costruita come precedentemente indicato, verrà usata come riepilogazione dei concetti chiave.

La mappa presente all'inizio svolge la funzione di un organizzatore anticipatore, cioè decodifica anticipatamente l'argomento, dando al fruitore l'idea di ciò che deve attendersi dal contenuto del capitolo. Un organizzatore anticipatore, inoltre, segnala (senza esprimerli, ovviamente) i punti fondamentali e i concetti chiave che saranno oggetto di discussione. Dal momento che il contesto all'interno del quale si inserisce l'uso delle mappe è un libro per ragazzi, una lettura extra-curricolare, si è cercato di dare alle mappe stesse un aspetto molto piacevole alla vista e più ludico rispetto a ciò che ci si aspetta di trovare in un libro di testo. Le mappe usate come organizzatore anticipatore nei cinque capitoli del libro avranno la stessa veste grafica: lo Schröggatto intento a preparare una pozione in un calderone. Gli ingredienti che userà saranno gli argomenti trattati nel capitolo in oggetto, la pozione finale sarà il titolo del capitolo stesso.



3.5 IMAGING

Il fatto che la nostra sia una "civiltà dell'immagine" non è solo un cliché. Le immagini fisse o in movimento sono sempre più richieste in ogni tipo di comunicazione della scienza, al punto da diventare, a volte, la ragione per parlare di un argomento. Le immagini attirano l'attenzione, suscitano emozioni immediate, possono aiutare a raccontare e a spiegare, perché risparmiano descrizione o hanno addirittura una valenza metaforica, creando una sinergia con il testo scritto. Per questo è vero che "un'immagine vale più di mille parole".

Il ricorso all'uso delle immagini come supporto all'apprendimento viene chiamato *imaging*.

Naturalmente, essendo il progetto pensato e strutturato per immagini, si attribuisce a questa metodologia di apprendimento un ruolo fondamentale.

Per la costruzione dei concetti va tenuto presente che il ragazzo nell'età dello sviluppo è sostanzialmente ancora un "pensatore concreto", ha bisogno di legare il contenuto a cui si approccia ad immagini che gli permettano di ancorarlo all'esperienza. Solo successivamente si innescherà un processo di evoluzione verso il pensiero astratto. Le immagini, in questo contesto, possono svolgere un ruolo importante, se si pensa che quasi il 40% dei neuroni del nostro cervello sono addetti alla decodifica del segnale visivo.

A sua volta, la formalizzazione attraverso il processo di astrazione aiuta a “vedere” meglio, perché indirizza l’attenzione in modo selettivo su aspetti che emergono come più importanti e vanno meglio compresi. Tuttavia bisogna sempre tenere presente che “vedere” non implica automaticamente “capire”, perché capire è una operazione della mente, non degli occhi. Come già sostenevano i filosofi presocratici, «non bisogna utilizzare, per conoscere, gli occhi che non vedono o gli orecchi che rimbombano di suoni illusori, mentre non sentono le armonie degli astri, in quanto ne sono stupidamente assuefatti, né il tatto che indica solo impressioni corporee.» Parmenide suggerisce di usare solo dell’intelligenza razionale della natura e di esercitare l’“occhio” della mente.⁵⁵

IMAGING



⁵⁵ H. Diels, W. Kranz (2006)

3.6 LINGUAGGIO

Un aspetto da tenere in considerazione quando si comunica il sapere scientifico, forse il principale, è quello del linguaggio: da una parte, si deve cercare di conservare il rigore e la precisione del linguaggio scientifico – pena la perdita parziale, o addirittura completa, del contenuto del messaggio – dall'altra parte, bisogna servirsi del linguaggio ordinario evitando però di ricorrere a facili sensazionalismi, che banalizzano il contenuto di ciò che si intende divulgare. Per quanto riguarda la divulgazione scientifica per adolescenti, è opinione di chi scrive che non sia necessario usare un linguaggio troppo semplificato per farsi capire dai ragazzi: un bambino che ascolterà usare il congiuntivo dai genitori, o qualsiasi altra forma grammaticale complessa, lo userà a sua volta, pur non conoscendone la struttura formale. Il metodo "Suzuki" in musica insegna ai bambini a suonare uno strumento, non insegna loro la struttura formale. Un bambino suonerà una croma con la giusta durata senza sapere che nel solfeggio vale $1/8$.

In che modo divulgare? Che livello del linguaggio scientifico usare nella divulgazione in modo che essa non rinunci ad essere chiara e comprensibile ma al contempo rigorosa? Piergiorgio Odifreddi parla di divulgazione scientifica in questi termini: «la vita è una lunga immersione, a vari livelli di volontarietà e

consapevolezza, in una cultura dalle forme molteplici [...]. Il parallelo estendersi dell'istruzione da un lato, e della capacità tecnologica di riproduzione di parole, suoni e immagini da un altro, ha prodotto un duplice ossimoro: una cultura di massa, e una massa di cultura. In particolare, produzione e fruizione sono salite in quantità e scese in qualità, in entrambi i casi drasticamente. [...] Per colmare il divario fra scienza e pubblico è nata la figura del divulgatore, col ruolo di interfaccia fra il linguaggio scientifico e quello naturale, e con la funzione di esprimere in parole le idee che lo scienziato ha tradotto in formule. Il linguaggio scientifico non è però una perversità, bensì una necessità: se fosse possibile esprimere sempre ed in modo efficiente le idee scientifiche con parole, gli scienziati lo farebbero essi stessi. [...] La divulgazione scientifica, nei casi in cui effettivamente abbia successo, può contribuire all'inserimento della scienza in una prospettiva culturale più vasta di quella in cui la confina il linguaggio scientifico. Proprio per la difficoltà della sua realizzazione e la delicatezza della sua funzione, la divulgazione richiede talenti che da un lato sappiano far evaporare dall'aridità delle formule la loro atmosfera intellettuale, e dall'altro riescano poi a farla precipitare in una forma letteraria che ne colga l'essenza.»⁵⁶

⁵⁶ P. Odifreddi (2003)

3.7 RISULTATI ATTESI

L'obiettivo del presente progetto, come già notato nei precedenti paragrafi, è l'informazione, non una formazione alla fisica quantistica. È rendere pubblico come le cose stanno e non "perché le cose stanno così" - impresa impensabile spiegare ad un bambino la struttura matematica della fisica quantistica.

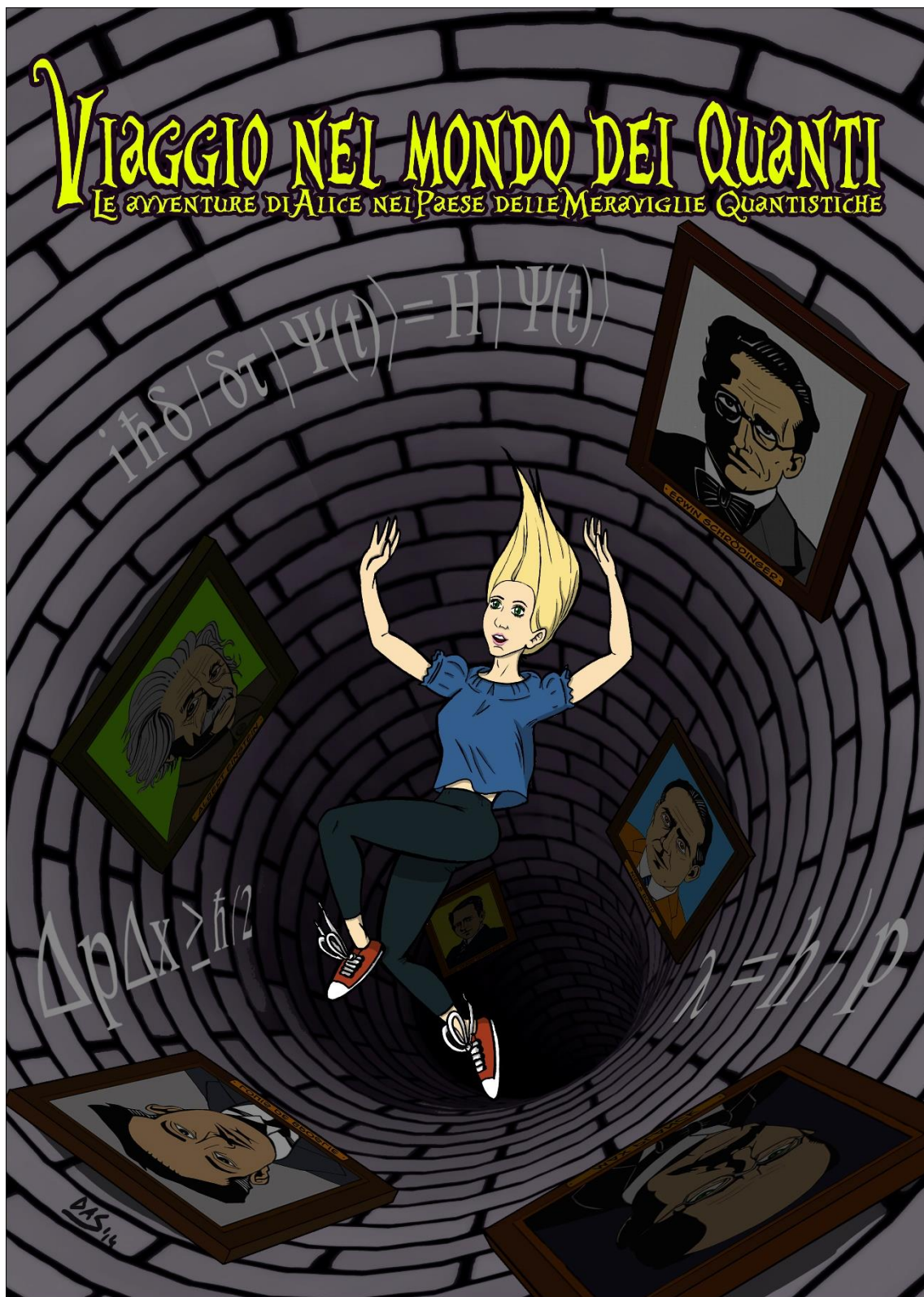
Altro obiettivo è quello di avvicinare gli adolescenti alla scienza e ai suoi metodi, attraverso la creazione di uno strumento didattico in grado di interessarli, incuriosirli, divertirli, far nascere in loro la voglia di ragionare, comunicare e confrontarsi.

L'approccio usato, quindi, non è quello di cercare il modo migliore di spiegare la fisica, problema di ordine didattico, o tantomeno di rispondere a tutte le domande; al contrario, l'intento è proprio quello di suscitare domande e creare interesse, voglia di spiegarsi il mondo.

Mentre la comunicazione della scienza per un pubblico adulto ha probabilmente come primo obiettivo quello di creare informazione e possibilmente consenso nonché finanziamenti sulla ricerca tecno-scientifica, la comunicazione della scienza per un pubblico di ragazzi oltre ad informare si pone l'obiettivo di interessare, coinvolgere, attirare i giovani a pensare, imparare a gratificarsi pensando razionalmente.

Avvicinare i ragazzi alla scienza ha un “valore aggiunto” che va al di là dei contenuti specifici: l’importanza dell’osservazione, della capacità di saper argomentare, la necessità di ascoltare gli altri, di imparare a discutere per cambiare e superare le proprie convinzioni. La scienza, inoltre, è forse il più importante esempio di cultura occidentale, condivisa da persone che appartengono a popoli, nazioni, culture e religioni diverse.

PARTE SPERIMENTALE

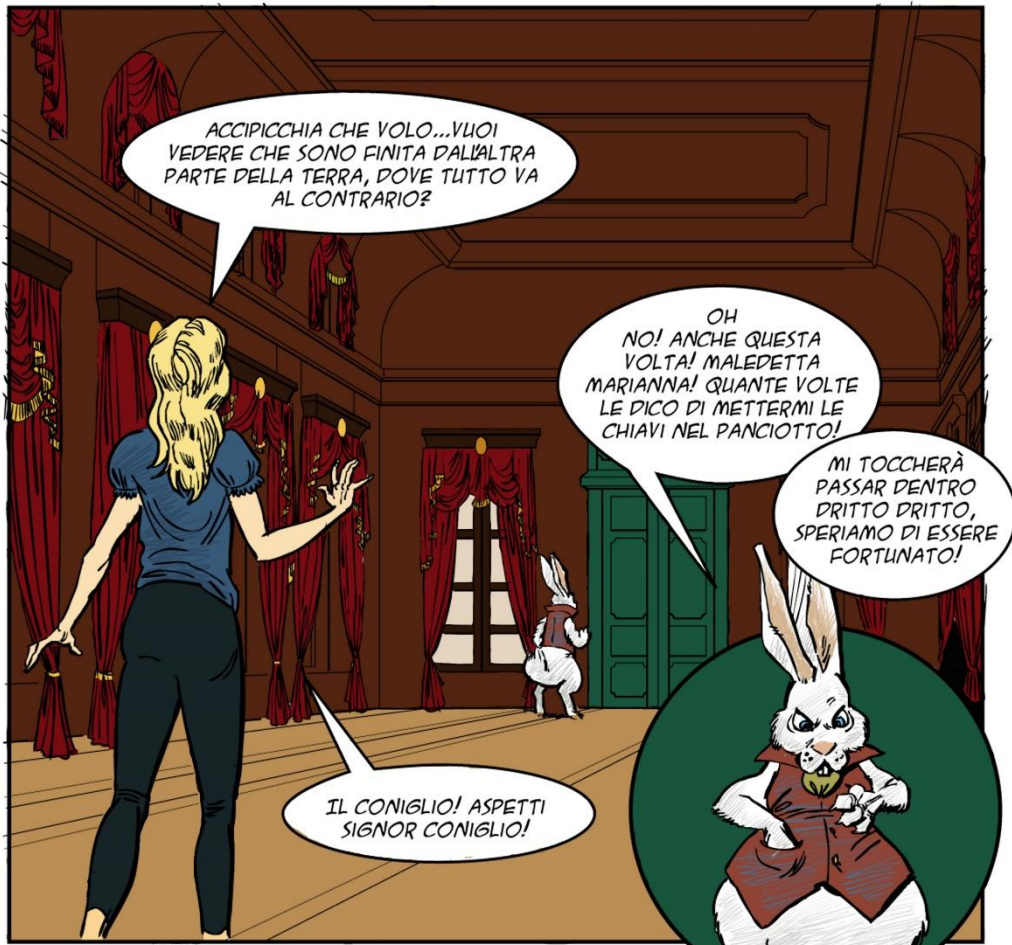


È UN POMERIGGIO D'AUTUNNO, LA SCUOLA È APPENA INIZIATA E ALICE SFOGLIA SVOGLIATAMENTE UN LIBRO.









ACCIPICCHIA CHE VOLO...VUOI VEDERE CHE SONO FINITA DALL'ALTRA PARTE DELLA TERRA, DOVE TUTTO VA AL CONTRARIO?

OH NO! ANCHE QUESTA VOLTA! MALEDETTA MARIANNA! QUANTE VOLTE LE DICO DI METTTERMI LE CHIAVI NEL PANCIOOTTO!

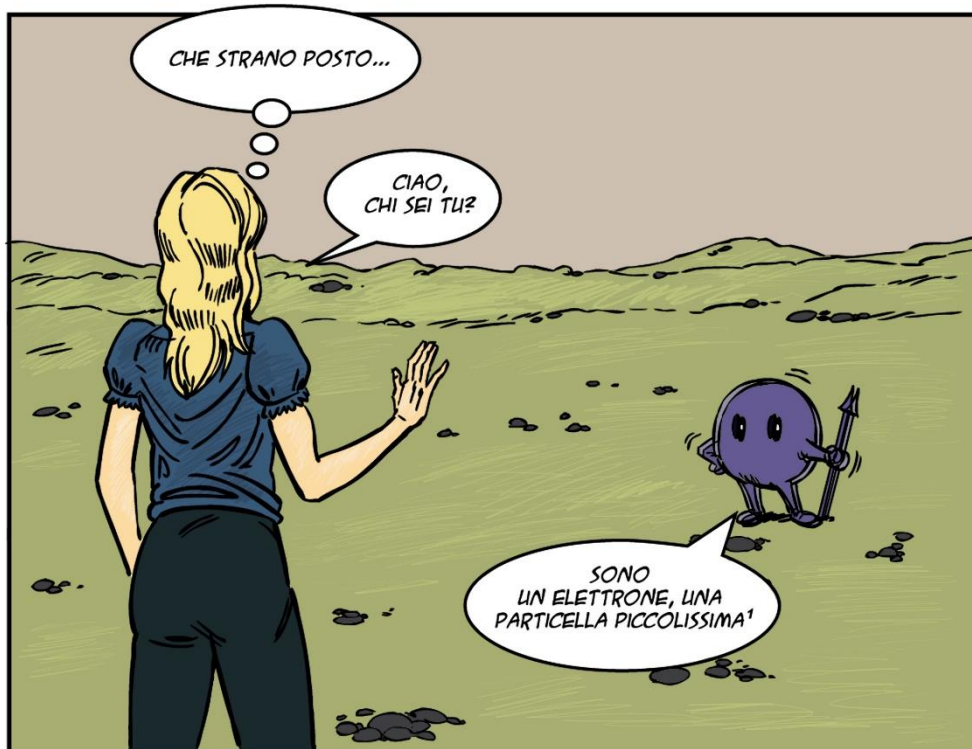
MI TOCCHERÀ PASSAR DENTRO DRITTO DRITTO, SPERIAMO DI ESSERE FORTUNATO!

IL CONIGLIO! ASPETTI SIGNOR CONIGLIO!

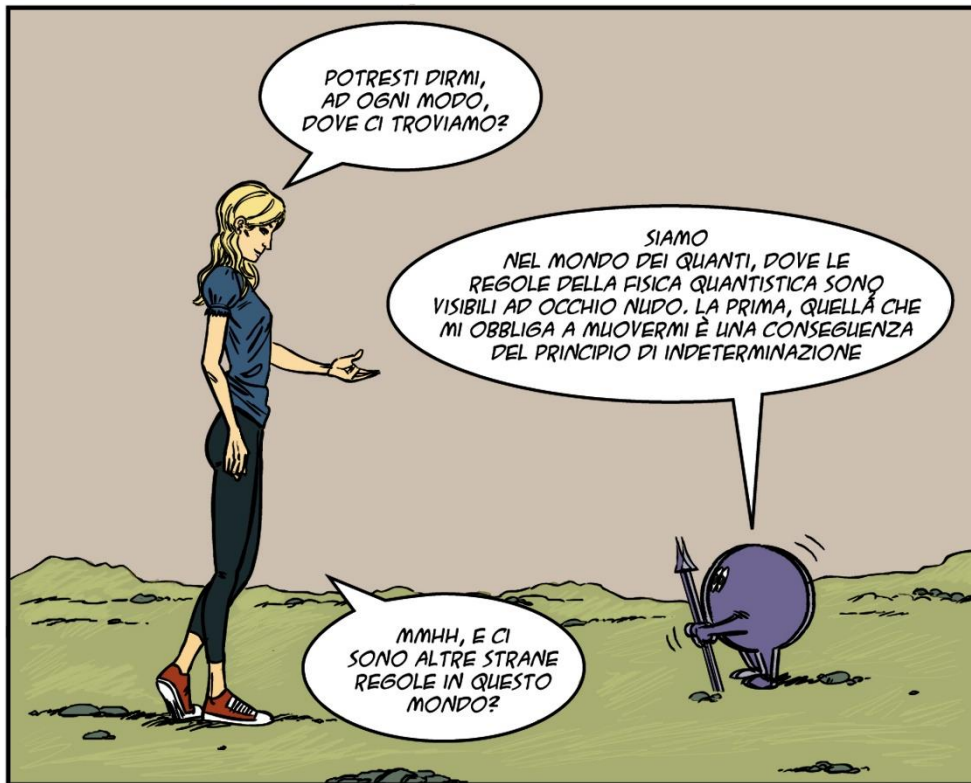


SIGNOR CONIGLIO! COSÌ FINIRÀ COL FARSI MALE, HA INTENZIONE DI BUTTAR GIÙ IL PORTONE?

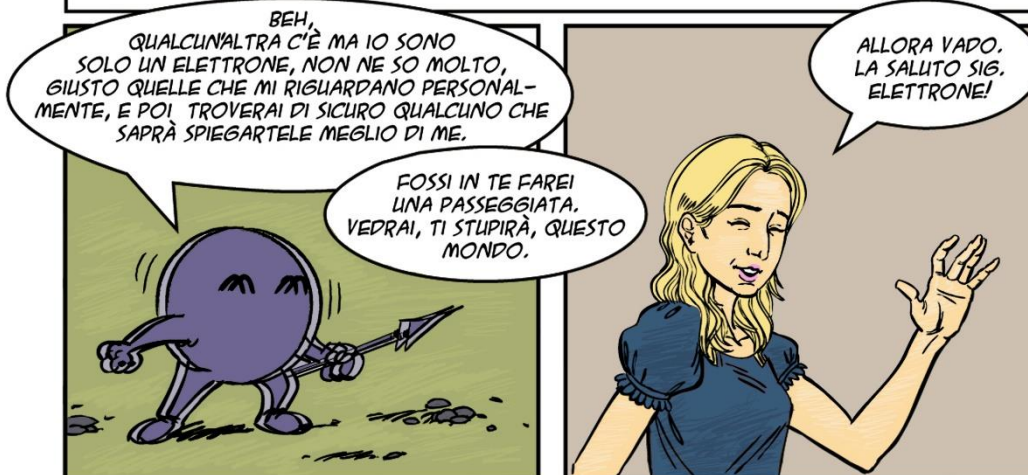




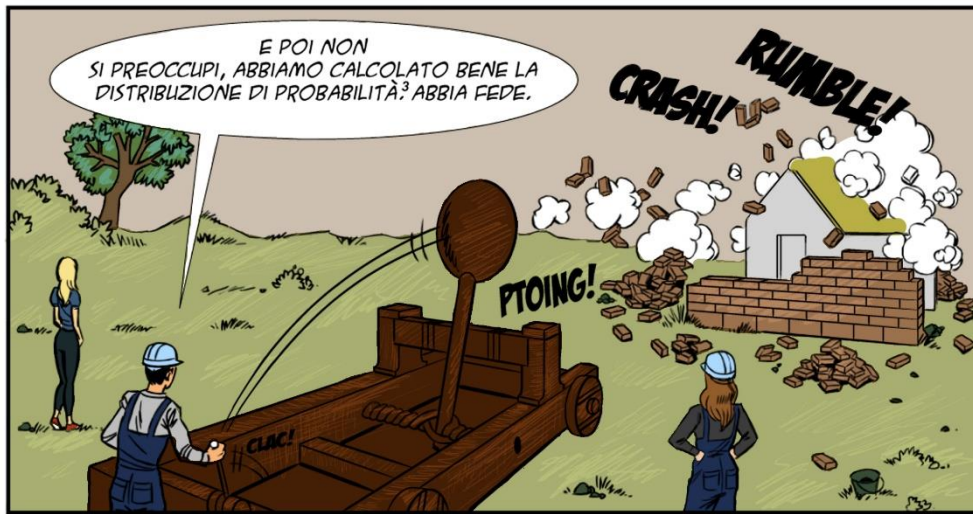
¹ GLI ELETTRONI SONO PARTICELLE SUBATOMICHE CON CARICA ELETTRICA NEGATIVA E NON HANNO ALCUNA CARATTERISTICA INDIVIDUALE DISTINTIVA, DATO CHE SONO COMPLETAMENTE IDENTICI GLI UNI AGLI ALTRI. È COME SE TUTTI GLI ELETTRONI RUOTASSERO ESATTAMENTE ALLA STESSA VELOCITÀ, INDIPENDENTEMENTE DAL VERSO CHE SI SCELGA PER MISURARE LA ROTAZIONE. L'UNICA DIFFERENZA È CHE ALCUNI RUOTANO IN UN SENSO, ALTRI IN UN ALTRO. A SECONDA DEL SENSO DI ROTAZIONE, SI PARLA DI ELETTRONI SPIN-UP O SPIN-DOWN, CHE METAFORICAMENTE VIENE RAPPRESENTATO CON UNA FRECCIA CHE PUNTA VERSO L'ALTO O VERSO IL BASSO.



² IL PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE Afferma che ci sono grandezze incompatibili tra loro, che quindi non possono essere misurate con precisione arbitraria. Una coppia di grandezze incompatibili sono la quantità di moto e la posizione. Il che implica che una particella non può star ferma in una data posizione, a meno che non occupi uno spazio enorme, dato che una particella ferma ha velocità nulla e quindi ben definita.







³ IL VALORE DI UNA GRANDEZZA FISICA NELLA MECCANICA CLASSICA VIENE SOSTITUITO, IN MECCANICA QUANTISTICA, DAL CONCETTO DI UNA DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ PER QUELLA GRANDEZZA. UNA DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ È IN SOSTANZA, UNA FUNZIONE MATEMATICA CHE, PER OGNI VALORE DELLA VARIABILE, FORNISCE LA PROBABILITÀ CHE VENGA OSSERVATO QUEL VALORE



CONTINUANDO A CAMMINARE ALICE INCONTRA, ADAGIATO SUL RAMO DI UN ALBERO, UNO STRANO GATTO...



DOMANDO SCUSA SIGNOR GATTO! POTREBBE INDICARMI PER FAVORE LA STRADA DA PRENDERE?

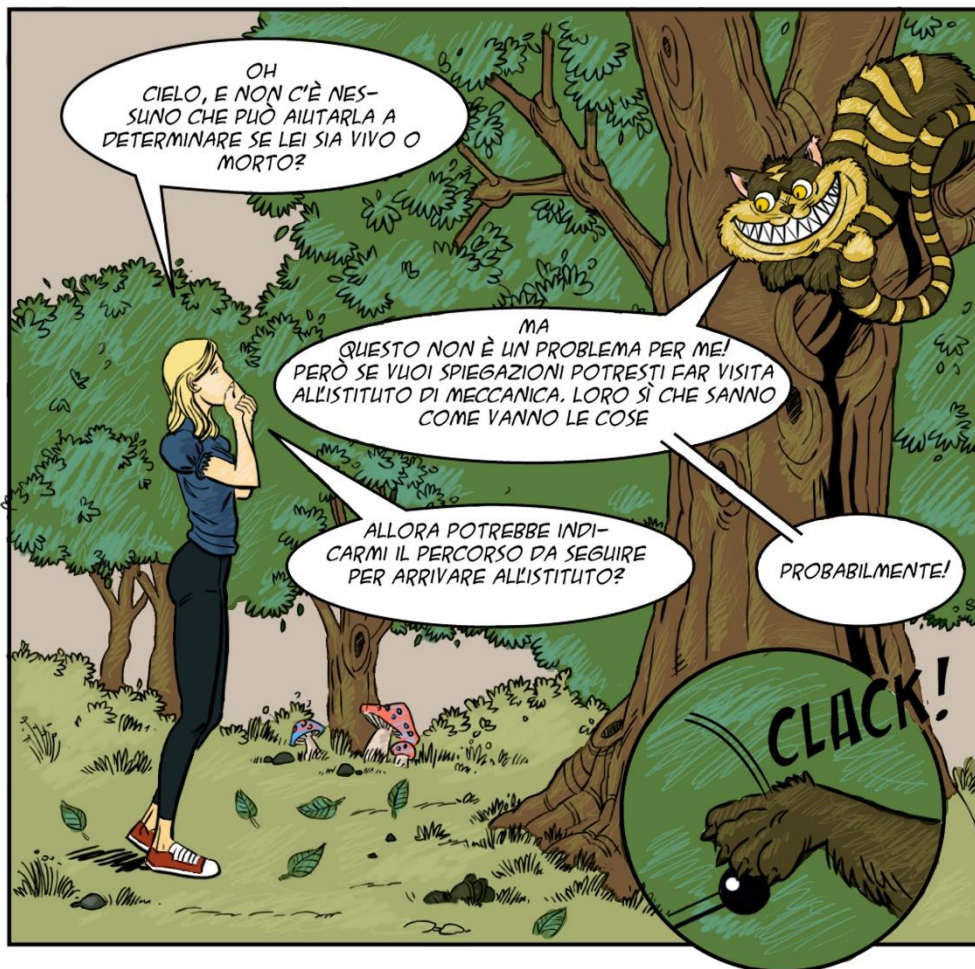
DIPENDE PIÙ CHE ALTRO DA DOVE VUOI ANDARE.

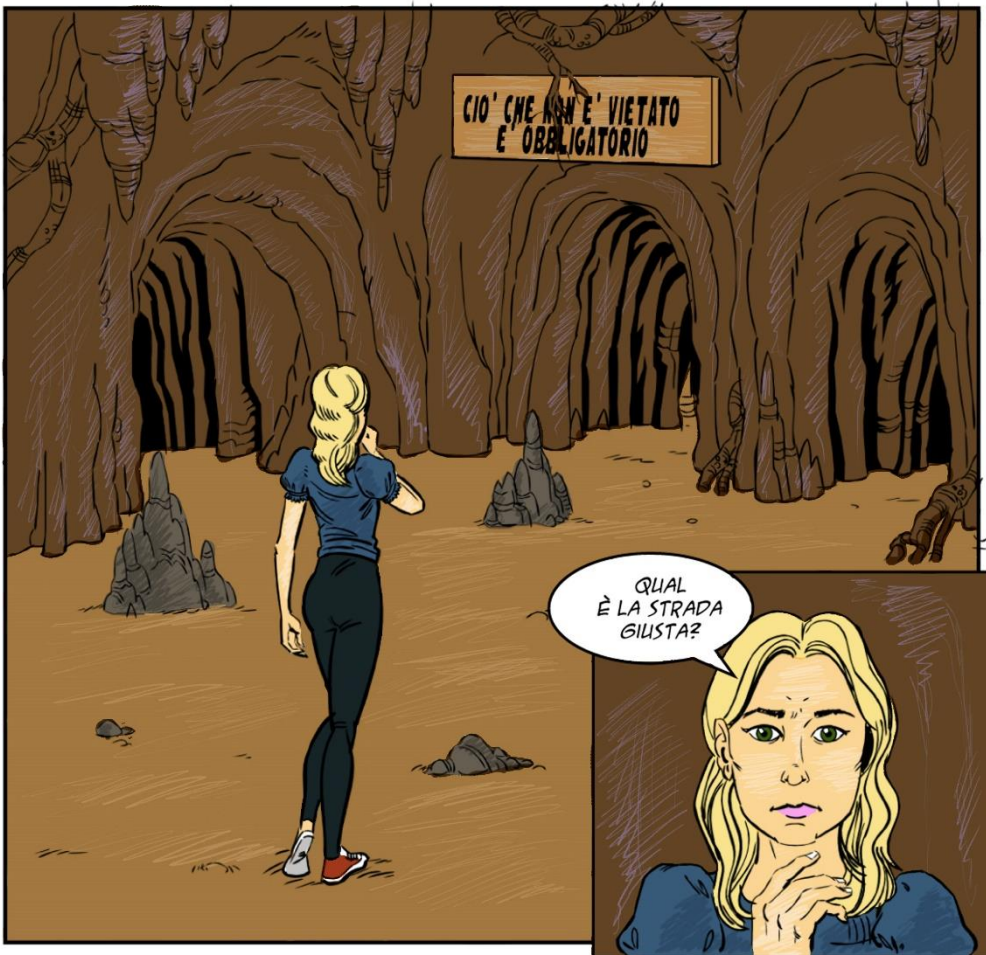
POTRESTI FAR VISITA ALLA LEPRE MARZOLINA, OPPURE AL CAPPELLAIO MATTO!

PER AMOR DEL CIELO! BASTA MATTI, HO GIÀ VISTO ABBASTANZA STRANEZZE IN QUESTO MONDO.



ORA CHE LA GUARDO BENE NON POSSO FARE A MENO DI NOTARE LO STRANO STATO IN CUI SI TROVA. HA MICA QUALCHE MALATTIA?

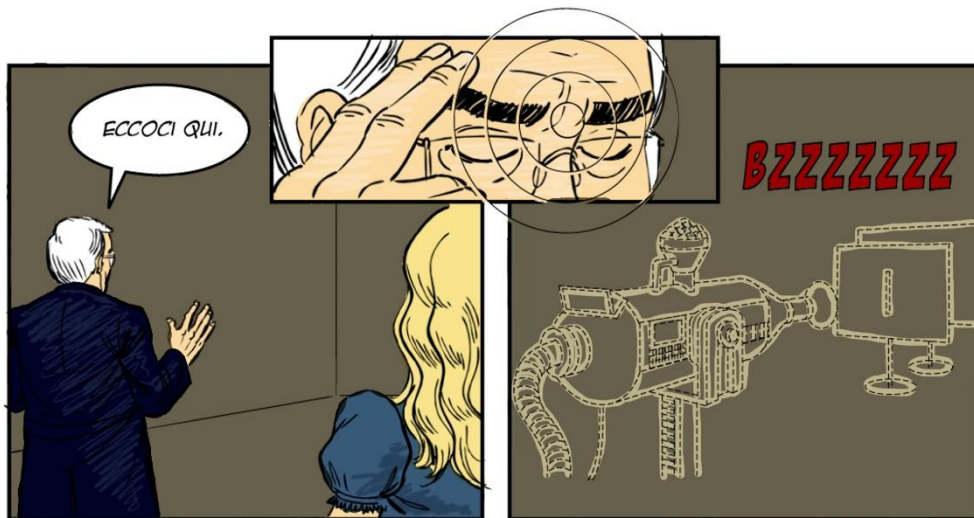








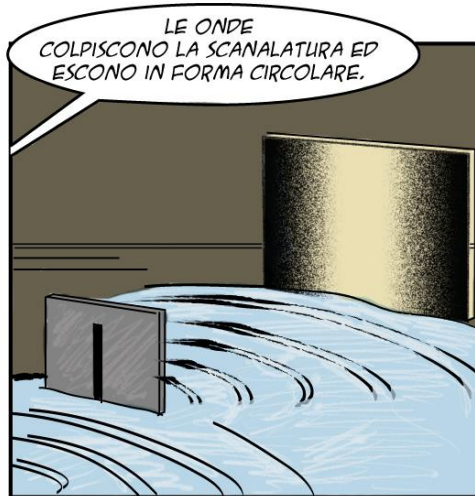




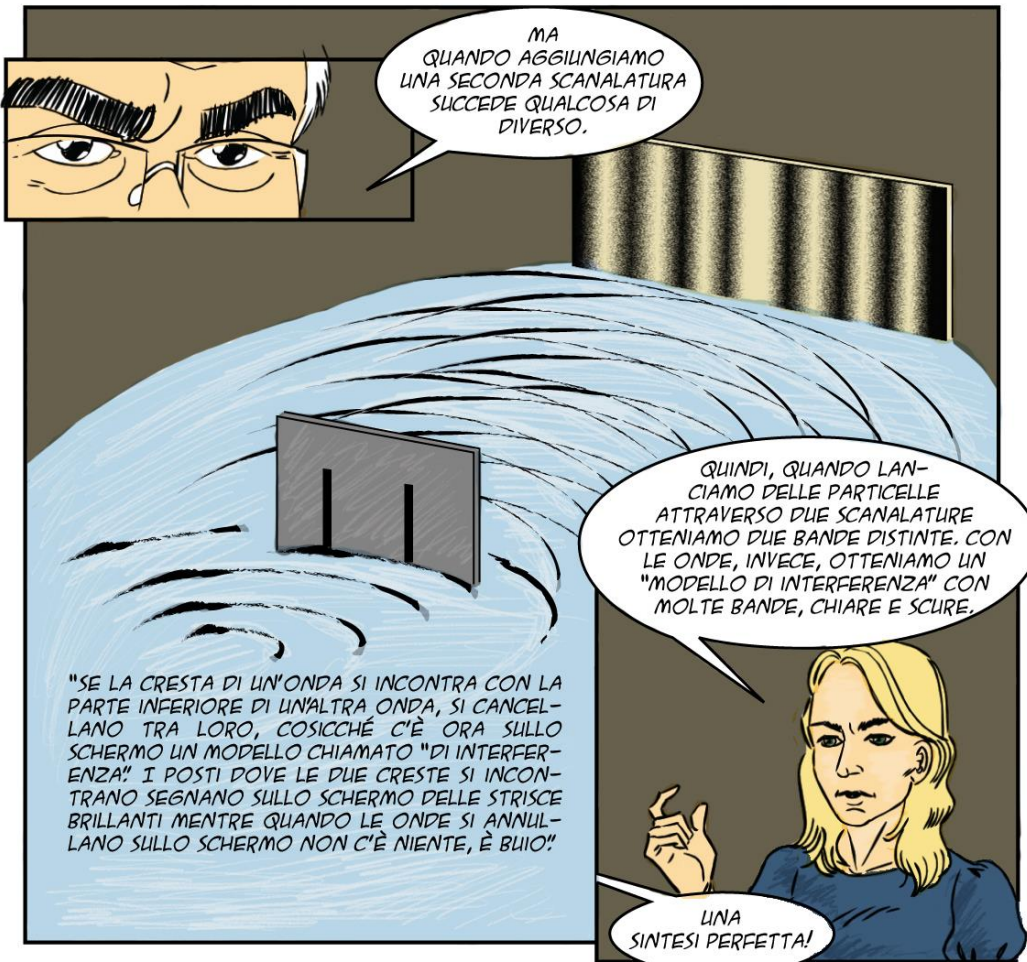


ORA GUARDIAMO LE ONDE.

ESISTONO DIVERSI TIPI DI ONDE IN FISICA, MA NOI PER SEMPLICITÀ CONSIDEREREMO LE ONDE D'ACQUA.



LE ONDE COLPISCONO LA SCANALATURA ED ESCONO IN FORMA CIRCOLARE.



MA QUANDO AGGIUNGIAMO UNA SECONDA SCANALATURA SUCCEDDE QUALCOSA DI DIVERSO.

QUINDI, QUANDO LANCIAMO DELLE PARTICELLE ATTRAVERSO DUE SCANALATURE OTTENIAMO DUE BANDE DISTINTE. CON LE ONDE, INVECE, OTTENIAMO UN "MODELLO DI INTERFERENZA" CON MOLTE BANDE, CHIARE E SCURE.

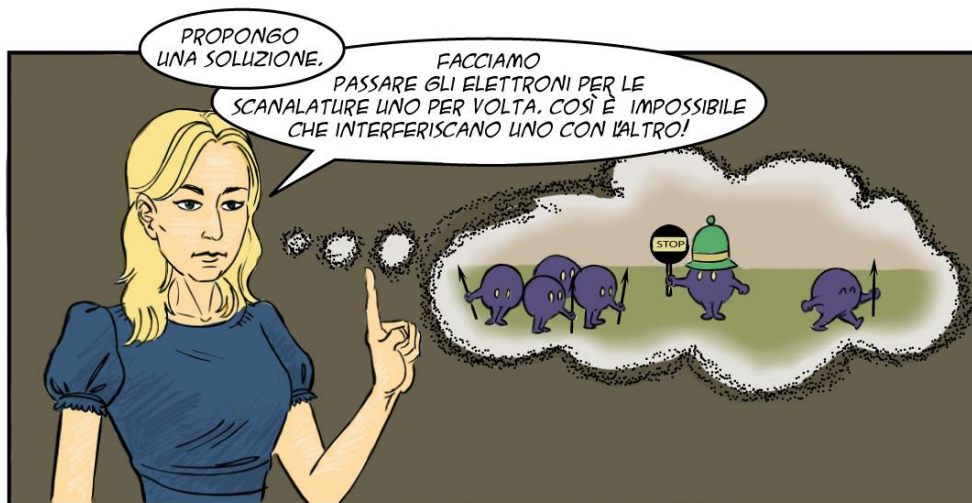
"SE LA CRESTA DI UN'ONDA SI INCONTRA CON LA PARTE INFERIORE DI UN'ALTRA ONDA, SI CANCELLANO TRA LORO, COSICCHÉ C'È ORA SULLO SCHERMO UN MODELLO CHIAMATO "DI INTERFERENZA". I POSTI DOVE LE DUE CRESTE SI INCONTRANO SEGnano SULLO SCHERMO DELLE STRISCE BRILLANTI MENTRE QUANDO LE ONDE SI ANNULLANO SULLO SCHERMO NON C'È NIENTE, È BUIO!"

UNA SINTESI PERFETTA!

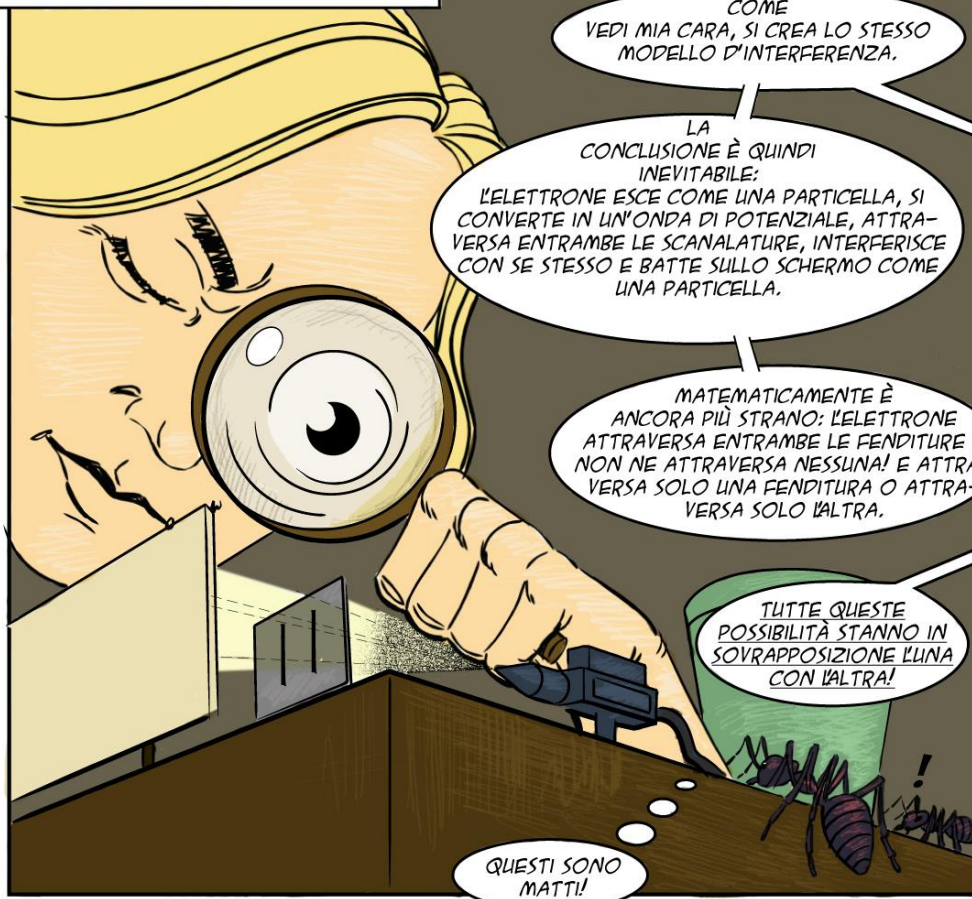


"SE NE SPARIAMO UNA RAFFICA
ATTRAVERSO UNA SCANALATURA SI
COMPORTA COME UNA PARTICELLA
QUALSIASI, CIOÈ DA ORIGINE A UNA
SOLA BANDA.
RIPETENDO IL PROCEDIMENTO
ATTRAVERSO UNA DOPPIA FEN-
DITURA DOVREMMO OTTENERE DUE
BANDE... MA, INVECE, OTTENIAMO
UN MODELLO D'INTERFERENZA!"



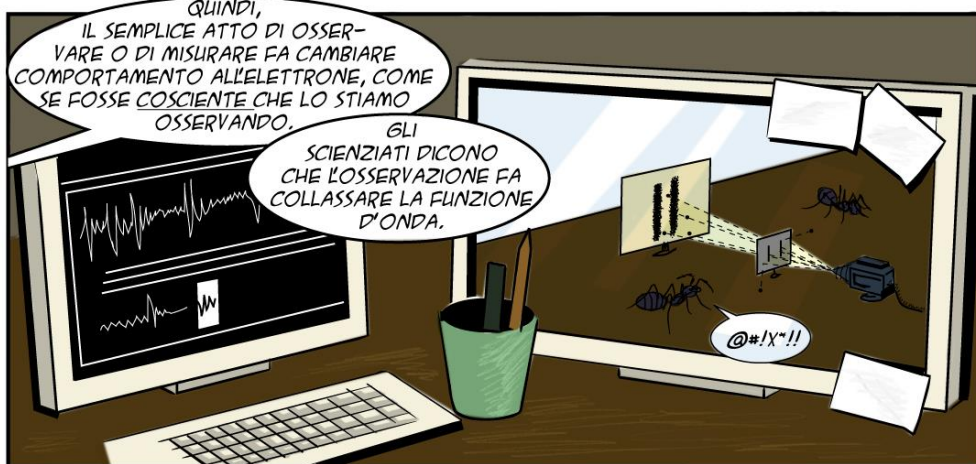


DOPO AVER CONDOTTO L'ESPERIMENTO SI VEDE EMERGERE LO STESSO MODELLO...





⁴ LA FISICA QUANTISTICA DESCRIVE IL COMPORTAMENTO DELLE PARTICELLE IN TERMINI DI DISTRIBUZIONI DI PROBABILITÀ E LE OSSERVAZIONI EFFETTIVE DI SPECIFICHE PARTICELLE SI VERIFICHERANNO A CASO ALL'INTERNO DI QUESTE PROBABILITÀ. TALI PROBABILITÀ POSSONO ANCHE INCLUDERE PROCESSI VIETATI DALLE TEORIE CLASSICHE, QUALI LA PENETRAZIONE DI PARTICELLE ATTRAVERSO UNA SOTTILE BARRIERA DI ENERGIA





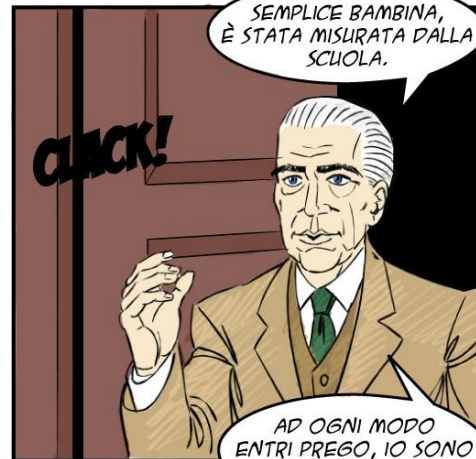
ISTITUTO "NIELS BOHR", UNIVERSITÀ DI COPENAGHEN



ACCIPICCHIA, HO DI NUOVO PRESO LA STRADA GIUSTA, ANCHE SE NON HO ANCORA CAPITO COME ABBIAMO FATTO A RIUSCIRCI.



SEMPLICE BAMBINA, È STATA MISURATA DALLA SCUOLA.



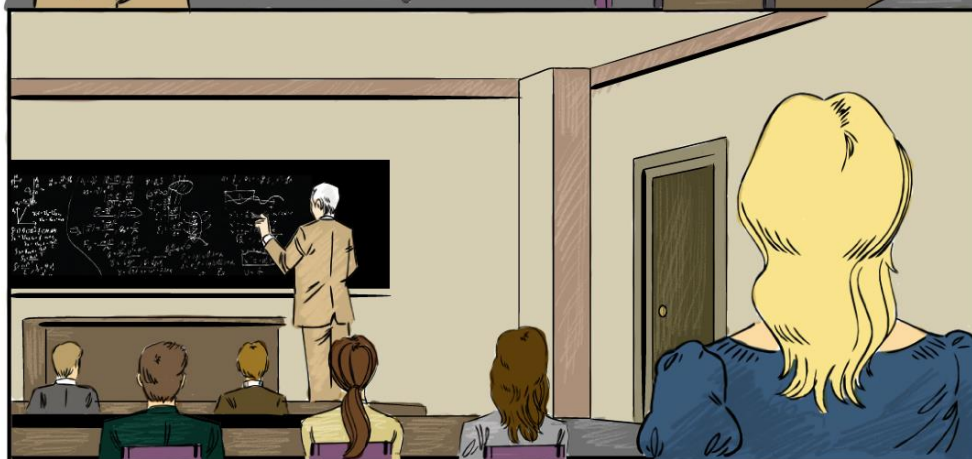
AD OGNI MODO ENTRI PREGO, IO SONO IL PROF BOHR.

PIACERE PROFESSORE, IO SONO ALICE E VENGO DA UN ALTRO MONDO, QUELLO DEL MECCANICO CLASSICO.

PERSONA ASSENNATA, MI HA SPIEGATO UN SACCO DI COSE...

MA QUANDO GLI HO CHIESTO PERCHÉ ESISTONO QUESTE STRANEZZE MI HA DETTO DI VENIRE ALLA SUA SCUOLA.









NOI SOSTENIAMO CHE NON AVVIENE ALCUN COLLASSO DELLA FUNZIONE D'ONDA, INFATTI TUTTE LE RAMIFICAZIONI DELLA FUNZIONE D'ONDA ESISTONO NELLO STESSO TEMPO.



"LA MISURA DETERMINA UNA SCISSIONE DELL'UNIVERSO IN TANTE RAMIFICAZIONI QUANTE SONO I POSSIBILI RISULTATI DELLA MISURA, E IN OGNUNA DI QUESTE RAMIFICAZIONI VIENE REALIZZATA UNA COMPONENTE DELLA FUNZIONE D'ONDA!"

ANCHE L'OSSERVATORE ESISTE IN OGNI RAMO IN UNO STATO DIFFERENTE ED È, PERCIÒ, ANCHE EGLI SCISSO. ANCHE L'OSSERVATORE ESISTE IN OGNI RAMO IN UNO STATO DIFFERENTE ED È, PERCIÒ, ANCHE EGLI SCISSO. ANCHE L'OSSERVATORE ESISTE IN OGNI RAMO IN UNO STATO DIFFERENTE ED È, PERCIÒ, ANCHE EGLI SCISSO. ANCHE L'OSSERVATORE ESISTE IN OGNI RAMO IN UNO STATO DIFFERENTE ED È, PERCIÒ, ANCHE EGLI SCISSO.





NOI SOSTENIAMO CHE IL CARATTERE PROBABILISTICO DELLA MECCANICA QUANTISTICA È DOVUTO ALLA PRESENZA DI PROPRIETÀ FISICHE A NOI NON ANCORA NOTI.

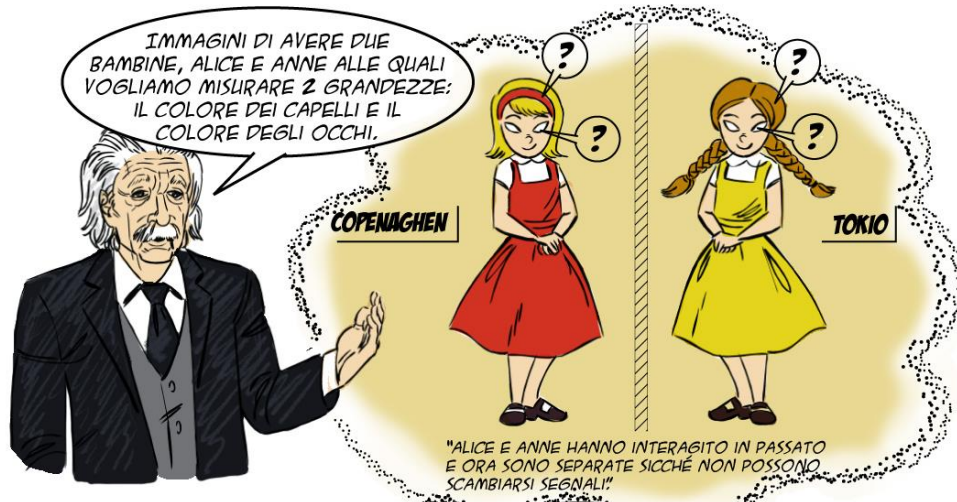


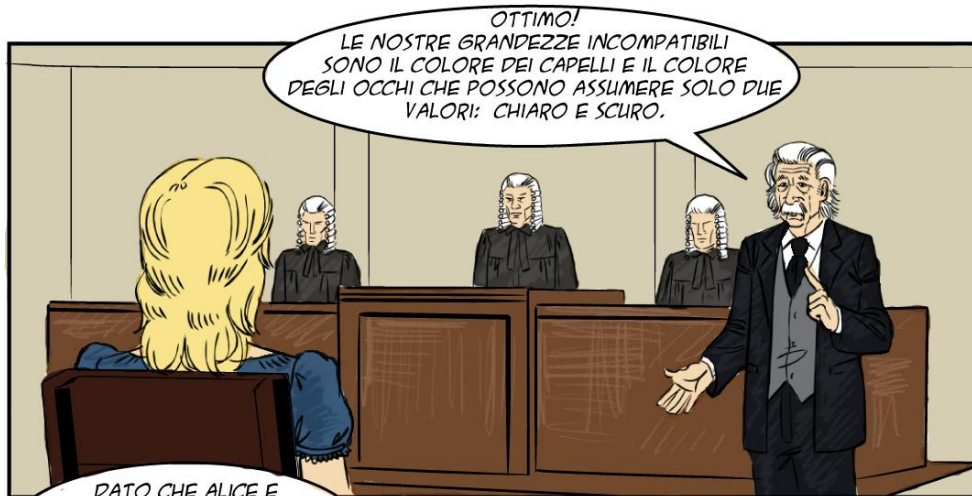
IN ALTRE PAROLE, LA MECCANICA QUANTISTICA, È UNA TEORIA FISICA INCOMPLETA.







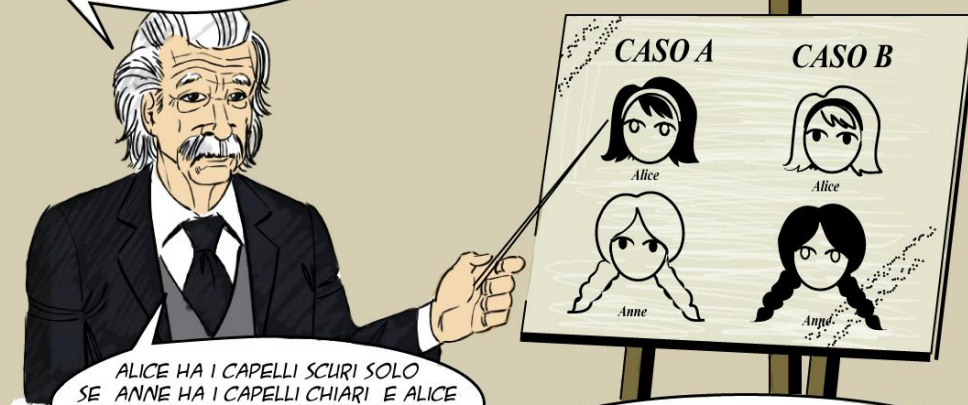




OTTIMO!
LE NOSTRE GRANDEZZE INCOMPATIBILI
SONO IL COLORE DEI CAPELLI E IL COLORE
DEGLI OCCHI CHE POSSONO ASSUMERE SOLO DUE
VALORI: CHIARO E SCURO.

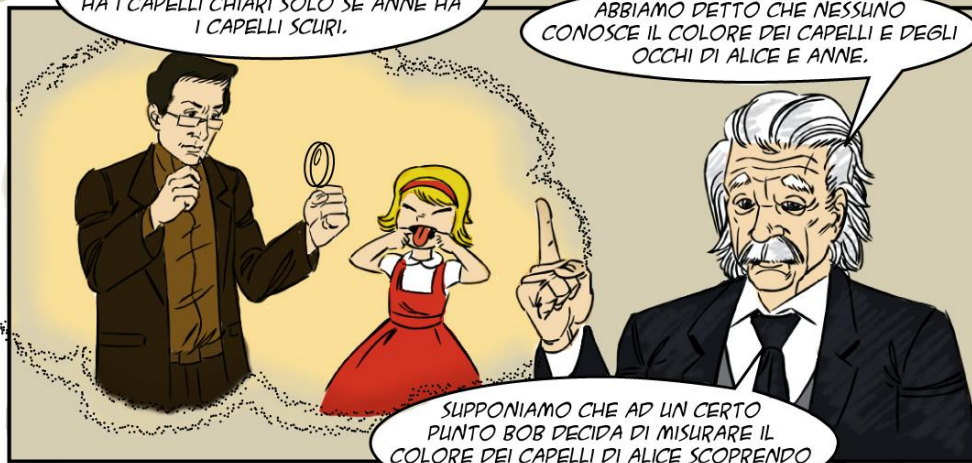
DATO CHE ALICE E
ANNE IN PASSATO HANNO
INTERAGITO, ORA POSSONO
VERIFICARSI SOLO DUE CASI.

"... E LO STESSO VALE PER LE GRANDEZZE
OCCHI SCURI, OCCHI CHIARI!"

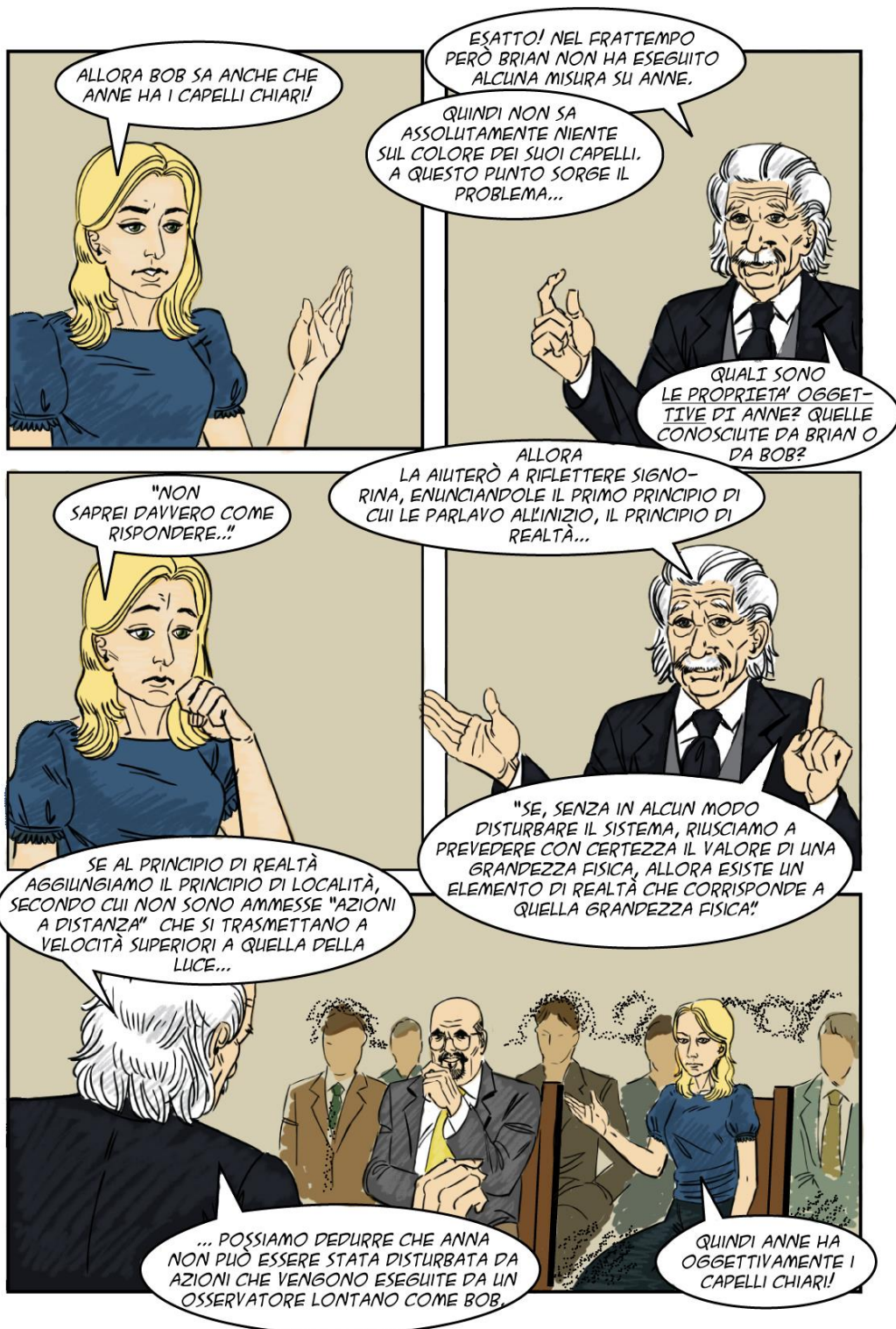


ALICE HA I CAPELLI SCURI SOLO
SE ANNE HA I CAPELLI CHIARI E ALICE
HA I CAPELLI CHIARI SOLO SE ANNE HA
I CAPELLI SCURI.

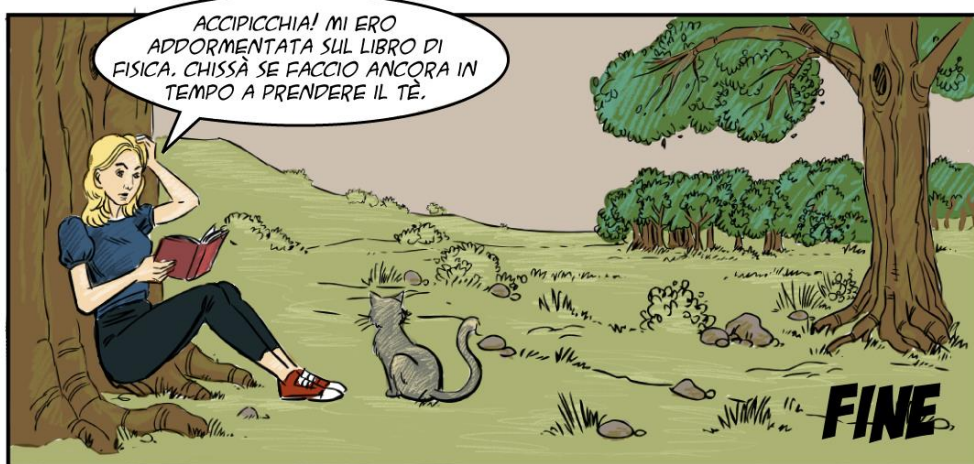
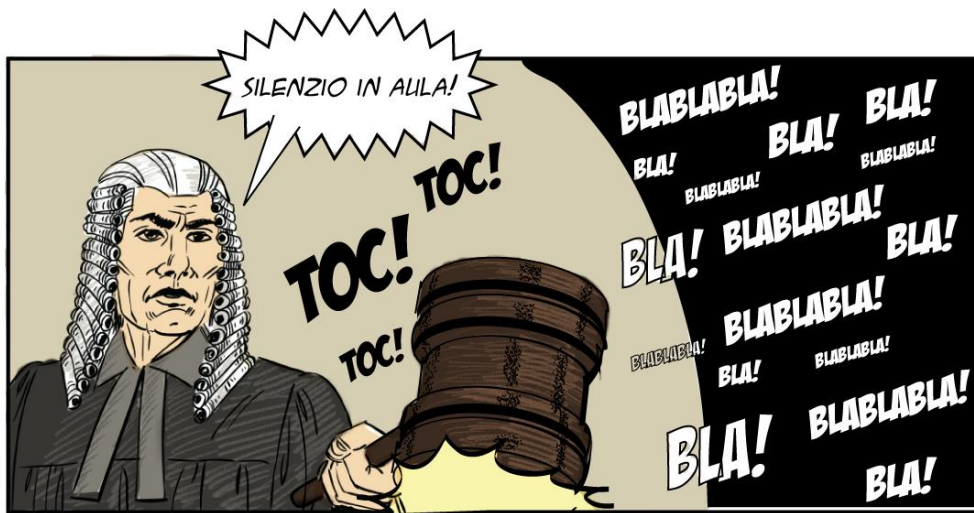
ABBIAMO DETTO CHE NESSUNO
CONOSCE IL COLORE DEI CAPELLI E DEGLI
OCCHI DI ALICE E ANNE.



SUPPONIAMO CHE AD UN CERTO
PUNTO BOB DECIDA DI MISURARE IL
COLORE DEI CAPELLI DI ALICE SCOPRENDO
CHE HA I CAPELLI SCURI.







VIAGGIO NEL MONDO DEI QUANTI

LE AVVENTURE DI ALICE NEL PAESE DELLE MERAVIGLIE QUANTISTICHE

IL RACCONTO





Fisica quantistica

QUANTIZZAZIONE

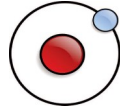
DUALITA'
ONDA-
PARTICELLA

PRINCIPIO DI
SOVRAPPOSIZIONE

PRINCIPIO DI
INDETERMINAZIONE

VIAGGIO NEL MONDO DEI QUANTI

Le avventure di Alice nel paese delle meraviglie della fisica quantistica



Un saluto a tutti i lettori, vorrei raccontarvi una storia che mi è successa, un incredibile viaggio in un mondo molto particolare, un mondo popolato da minuscole particelle, invisibili ad occhio nudo, che obbediscono a delle leggi curiose e a volte strampalate, molto lontane dalle leggi che regolano il nostro mondo. Questo mondo si chiama mondo dei quanti, e le leggi a cui i suoi abitanti obbediscono sono le leggi della fisica quantistica.



Per cercare di farvi capire tutto quello che ho scoperto e imparato dal mio viaggio cercherò di fare come mi è stato consigliato da un amico incontrato nel mondo dei quanti: partirò dall'inizio, e quando arriverò alla fine, mi fermerò!

CHE COS'È LA FISICA?

La fisica (dal greco *phýsis* = natura) è la scienza che studia i fenomeni naturali per descriverli e misurarne le proprietà e stabilendo tra queste relazioni matematiche (leggi).

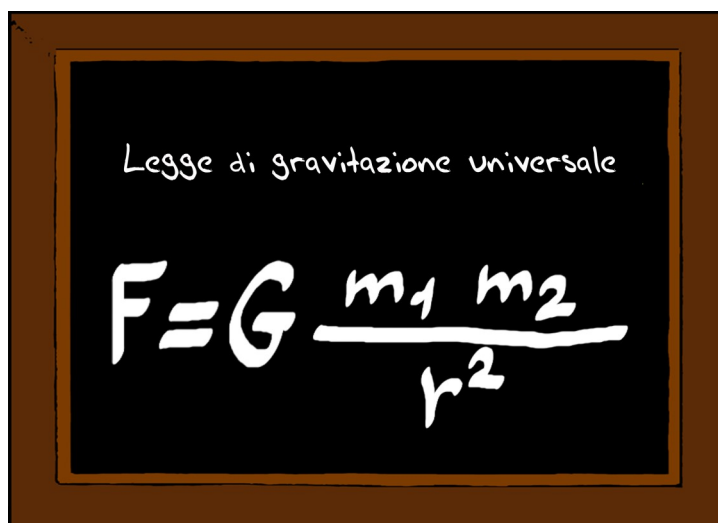
Per raggiungere questo scopo, la fisica, come le altre scienze, si avvale di un metodo di indagine detto metodo sperimentale, cioè basato sull'esperimento riproducibile



COME NASCE LA FISICA QUANTISTICA?

Per capire com'è nata la fisica quantistica occorre partire, come sempre, con un po' di storia.

Alla fine dell'Ottocento gli scienziati erano convinti di aver compreso e spiegato tutti i principi fondamentali e le leggi che governavano la natura. Per quanto riguarda il mondo microscopico, cioè le scienze che studiano i componenti della materia [[LEGGI IL RIQUADRO](#)], tutti gli studi e le ricerche avevano concluso che l'atomo fosse l'elemento più piccolo di cui erano formate tutte le cose esistenti, infatti la parola "atomo" deriva dal greco e vuol dire indivisibile. Gli atomi erano considerati i mattoncini con cui è costruito il mondo. Per quanto riguarda invece lo studio dell'universo e degli oggetti che lo popolano, un famosissimo scienziato di nome Isaac Newton aveva scoperto una legge, da lui chiamata **Legge di Gravitazione Universale**, che spiegava con estrema precisione i movimenti dei pianeti e di tutti gli altri corpi celesti.



Legge di gravitazione universale

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

CHE COS'È LA MATERIA?

Vi siete mai chiesti di cos'è fatto tutto ciò che ci circonda?
Il nostro corpo, i vestiti che indossiamo, il PC che usiamo,
la carta sulla quale state leggendo?
La risposta è: la materia.



La materia è ciò di cui sono fatti gli oggetti, viventi e non, anche se molto diversi tra loro. Tutti gli oggetti sono formati da materia ed occupano uno spazio; in alcuni casi (come per gli oggetti che studia la fisica quantistica) lo spazio è veramente piccolissimo.



Sembrava non ci fosse più niente da scoprire, tutto era perfettamente spiegato, l'universo intero sembrava funzionare come un gigantesco orologio, un meccanismo preciso e impeccabile, i cui componenti si incastravano perfettamente e facevano funzionare tutti i rami delle scienze.



Nella fisica classica tutto era perfettamente spiegato e l'universo intero, sembrava funzionare alla perfezione, proprio come un precisissimo orologio svizzero!

Ma, nei primi decenni del novecento, questa formidabile macchina che era la scienza cominciò ad incepparsi. Accadde che uno studio più approfondito dell'atomo e di alcuni fenomeni fisici mandarono in crisi la fisica classica dando origine alla fisica quantistica.

Lo scienziato che iniziò ad intaccare le certezze su cui si fondava la fisica classica fu il fisico tedesco Max Planck, considerato il padre della fisica quantistica. Da anni Planck cercava di trovare una spiegazione per un fenomeno fisico chiamato "problema del corpo nero", un corpo "ideale" - cioè un corpo perfetto che non esiste in natura - la cui caratteristica fondamentale è quella di assorbire tutta la luce in arrivo su di esso (ad es. la radiazione infrarossa, la luce visibile, la radiazione ultravioletta, etc.). Il corpo nero è chiamato così proprio perché quando un oggetto assorbe tutta la radiazione visibile assume un colore nero (al contrario, quando la riflette tutta, assume il colore bianco).

Descrivere il suo comportamento era un annoso problema della fisica teorica e nel 1900 Planck ottenne una formula che era in perfetto accordo con i risultati degli esperimenti; la formula però aveva senso solo se si abbandonava l'idea che l'energia [LEGGI IL RIQUADRO] scorresse sempre in modo continuo, come un fiume che scorre rapido verso il mare, e si cominciasse a pensare che l'energia fosse formata da piccoli pacchetti indivisibili, nettamente separati uno dall'altro, unità minime di energia chiamate **quanti**. Ed ecco che compaiono nella fisica per la prima volta i quanti.

CHE COS'È L'ENERGIA?

L'energia rappresenta l'attitudine a svolgere un lavoro, ossia a "fare qualcosa". Quando siamo stanchi, ci sentiamo senza energia, spossati, come una pila esaurita... ossia non saremmo in grado di svolgere alcuna attività (o lavoro). Ma, quante forme di energia esistono? Tante, tutte diverse una dall'altra, qui vi indico le più comuni:

Energia Meccanica: legata a posizione e velocità dei corpi, come un martello che "battendo" pianta un chiodo

Energia Elettrica: legata a movimento di particelle cariche elettricamente, come la corrente

Energia Nucleare: legata a reazioni fisiche che coinvolgono il nucleo di alcune sostanze



Planck in realtà non si rese conto sul momento della novità radicale del suo lavoro; egli pensava che i quanti in realtà non esistessero affatto! Era convinto di aver solo giocato un po' con la matematica per arrivare alla "risposta giusta", e pensava che qualcun altro avrebbe trovato una spiegazione migliore per la sua formula.



Costante di Planck

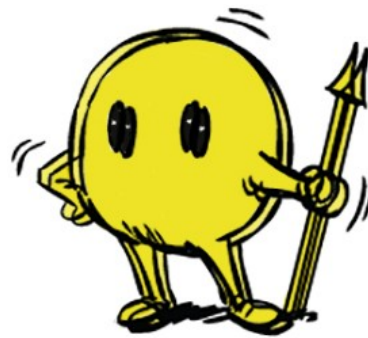
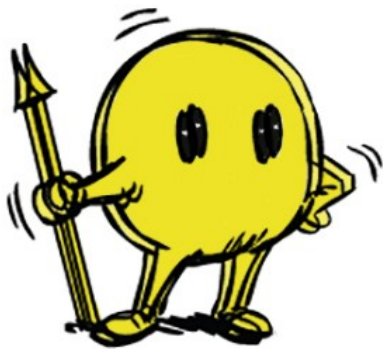
$$\hbar \equiv \frac{h}{2\pi}$$



Il quanto, detto anche costante di Planck, è un numero talmente piccolo che è quasi impossibile da immaginare. Gli scienziati che studiano gli atomi e tutte le particelle microscopiche non possono fare a meno di tenere conto della sua esistenza, invece noi, che abbiamo a che fare con gli oggetti che ci circondano, proprio a causa della sua estrema piccolezza, non riusciamo a renderci conto della sua esistenza e quindi della discontinuità della materia.



L'ipotesi di Planck, di questi piccolissimi pacchetti di energia, si è ben presto trasformata in qualcosa di più profondo di un semplice trucco per "far tornare i conti". Se ne servì anche un altro famosissimo scienziato, Albert Einstein, per giustificare un altro fenomeno difficile da spiegare, l'effetto fotoelettrico, un effetto che si verifica quando la luce colpisce una lastra metallica. Basandosi sul lavoro di Planck, Einstein propose che anche la luce trasportasse la sua energia in pacchetti; essa consisterebbe dunque di piccole particelle chiamati **fotoni**.



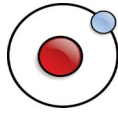
In definitiva le nuove scoperte fatte dagli scienziati in quel periodo furono così importanti e sconvolgenti che fecero perdere gran parte delle certezze su cui si basava la fisica classica, e fecero gradualmente comprendere che la conoscenza della realtà era ben lontana dall'essere completa.



I quanti per certi aspetti sono un po' come i bit che trasportano l'informazione digitale, piccolissimi pacchetti di informazione che possono essere solo di due tipi: 0 o 1. Tutte le informazioni che viaggiano attraverso i pc o nella rete non sono altro che una lunga successione di 0 e 1. Non esistono mezzi bit, i bit vanno sempre presi per intero. Sono così piccoli e così tanti che sembrano un flusso continuo ma in realtà si tratta di una successione discreta di 0 e 1



COSA STUDIA LA FISICA QUANTISTICA?



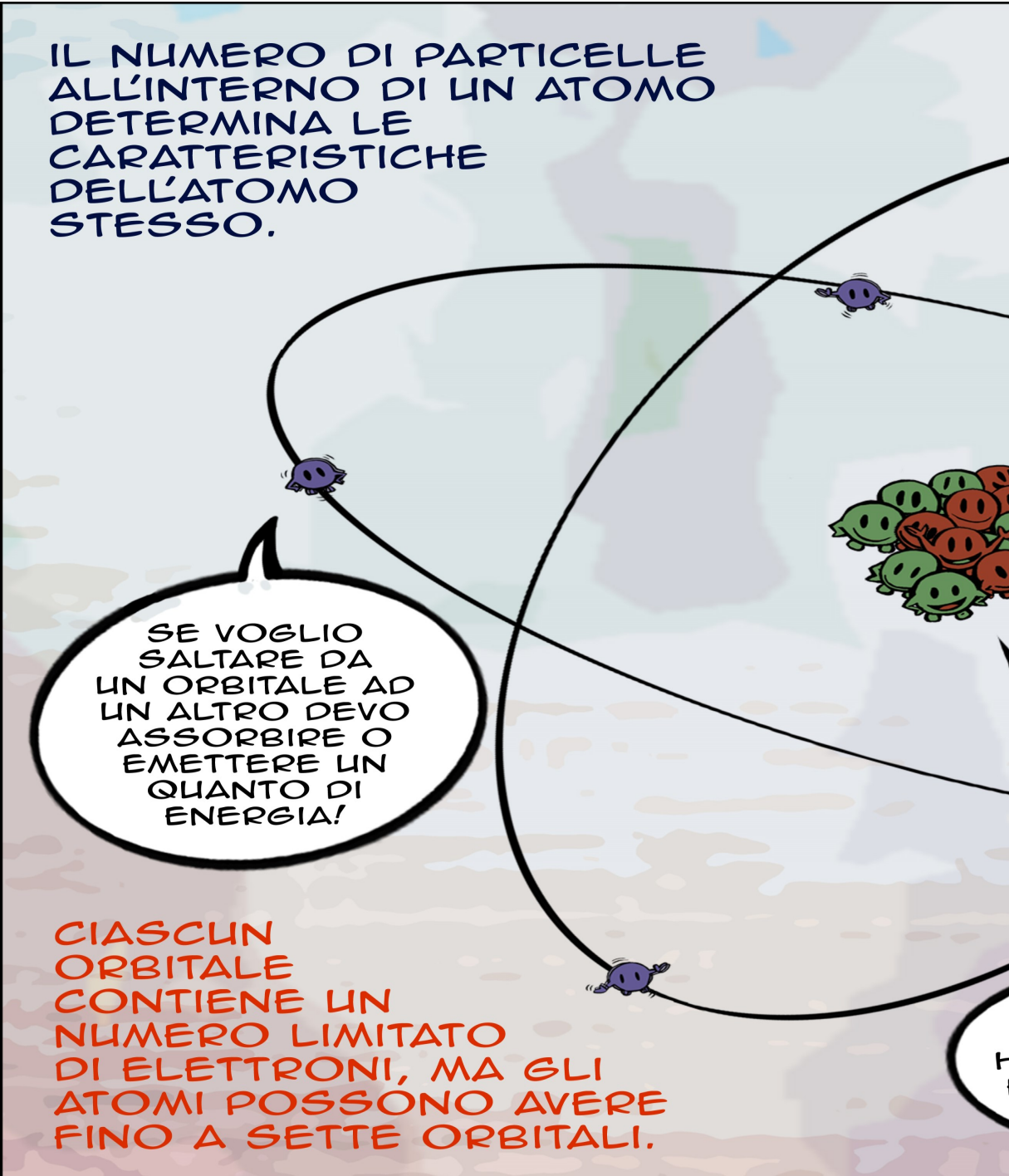
Ora che è più chiaro quali sono le premesse e i motivi per cui nasce la fisica quantistica possiamo cercare di capire di preciso di cosa si occupa.



La fisica quantistica è la scienza che fornisce la descrizione più accurata di tutti i fenomeni naturali. Studia quelle che gli scienziati chiamano “particelle elementari” cioè le particelle più piccole esistenti che vengono anche chiamate particelle sub-atomiche perché più piccole degli atomi. Per spiegare la struttura e il comportamento degli atomi e delle particelle sub-atomiche si serve dei quanti, pacchetti indivisibili di energia.

Eh sì, avete letto proprio bene...in realtà l'atomo non è il componente più piccolo esistente della materia, oggi sappiamo che gli atomi sono formati a loro volta da particelle ancora più piccole: protoni, neutroni ed elettroni.

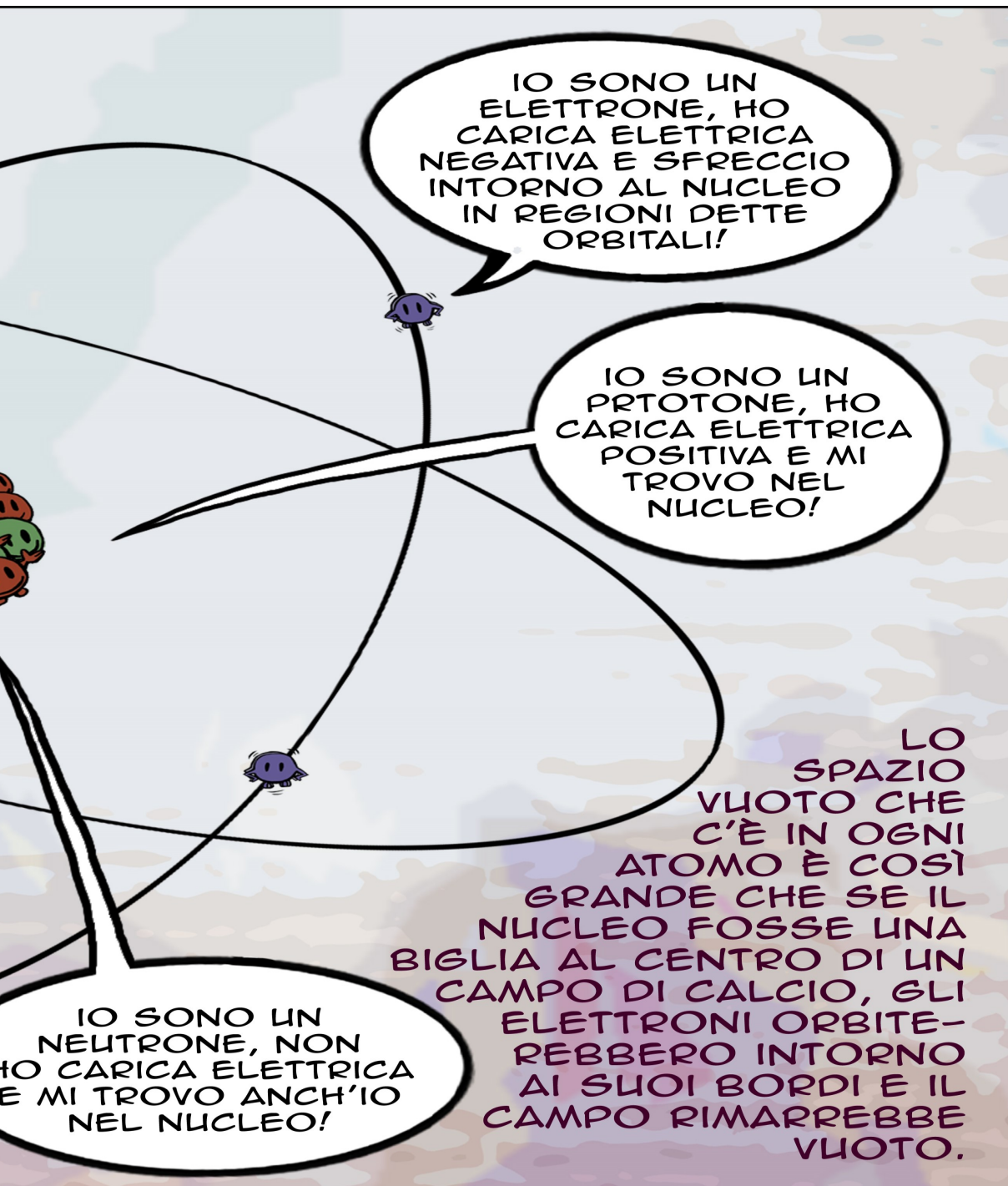
IL NUMERO DI PARTICELLE ALL'INTERNO DI UN ATOMO DETERMINA LE CARATTERISTICHE DELL'ATOMO STESSO.



SE VOGLIO SALTARE DA UN ORBITALE AD UN ALTRO DEVO ASSORBIRE O EMETTERE UN QUANTO DI ENERGIA!

CIASCUON ORBITALE CONTIENE UN NUMERO LIMITATO DI ELETTRONI, MA GLI ATOMI POSSONO AVERE FINO A SETTE ORBITALI.

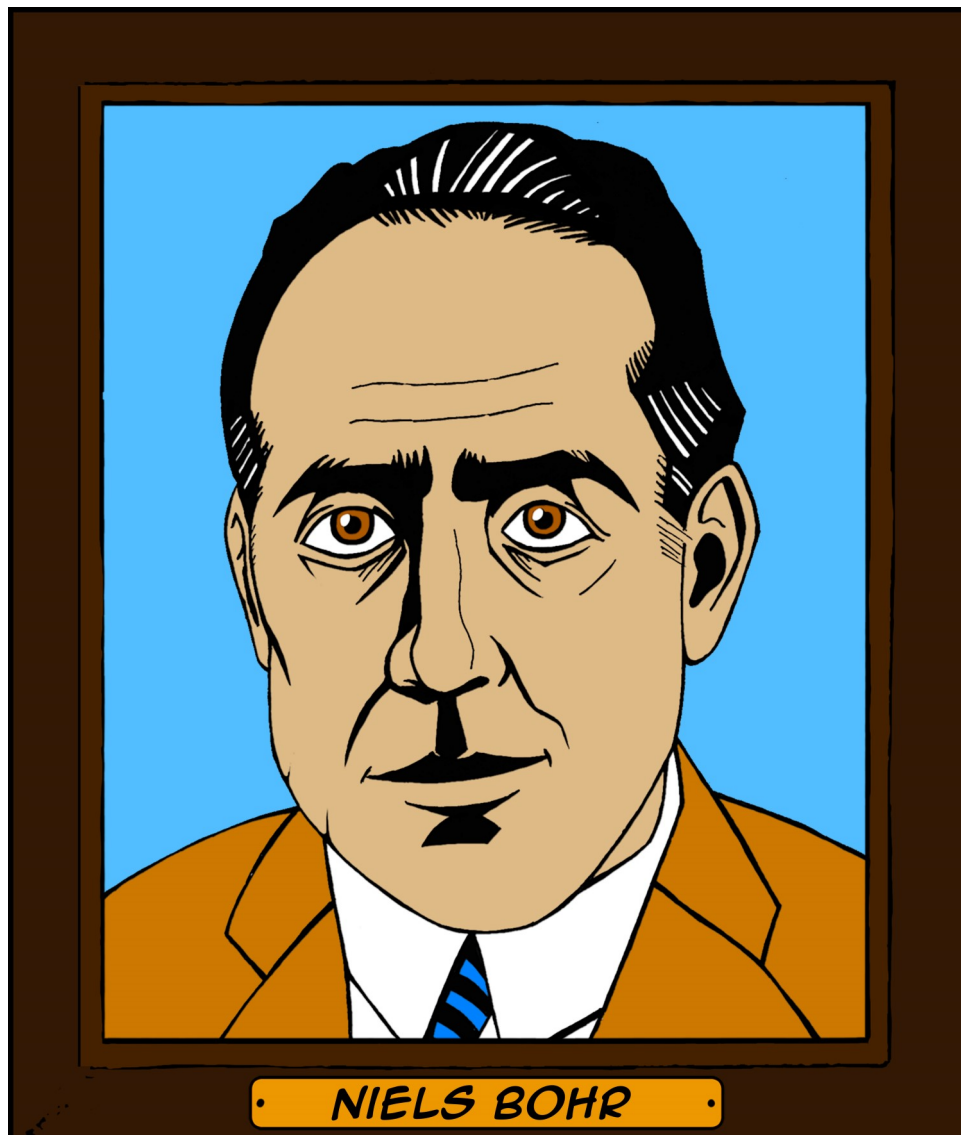
Possiamo immaginare un atomo come una miniatura del nostro sistema solare con al centro il Sole e intorno tutti i pianeti compresi la Terra.



Al centro vi sono i protoni con carica positiva e i neutroni con carica neutra e insieme formano il nucleo. Attorno al nucleo ruotano gli elettroni, con carica negativa.

L'elettrone però non ruota intorno al nucleo su orbite (cioè traiettorie) qualsiasi ma su orbite fisse particolari; se l'elettrone ruota su queste orbite privilegiate potremmo dire che non si stanca, quindi non emette energia. Quando però passa da un'orbita all'altra emette o assorbe un quanto di energia.

Il modello atomico che vi ho appena descritto è stato proposto dal fisico danese Niels Bohr, uno dei padri fondatori della fisica quantistica.



le dimensioni dell'atomo: gli atomi sono così piccoli che il punto alla fine di questa frase ne contiene circa 6 milioni!



Tra le teorie nate nel secolo scorso la fisica quantistica è quella che ha modificato più di ogni altra l'idea che gli uomini si erano fatti sulla natura, su ciò di cui è costituita e anche sui processi che le permettono di funzionare così bene.

Ha rivoluzionato sia la nostra vita quotidiana sia alcuni dei principi su cui si fonda il nostro modo di ragionare (sebbene spesso li diamo così per scontati da non rendercene conto).

Forse non ne siamo consapevoli ma quando usiamo il computer, il cellulare o qualsiasi elettrodomestico con componenti elettroniche, sfruttiamo fenomeni fisici che appartengono al dominio della fisica quantistica.

Inoltre la fisica quantistica è stata anche la maggiore rivoluzione intellettuale degli ultimi cento anni, e ha contribuito a ridimensionare alcuni dei principi base, fortemente legati al senso comune, che contribuiscono a formare la nostra visione del mondo.

Che vuol dire quello che avete appena letto?

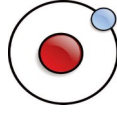
Semplice, se prendiamo un sasso e lo lanciamo in acqua cosa ci aspettiamo che succeda? Immagino che tutti siamo della stessa opinione: lo specchio dell'acqua si incresperà come conseguenza dell'urto del sasso. E naturalmente lo farà solo dopo un certo tempo, quello che occorrerà al sasso per finire in acqua.

Questo è quello che in fisica si chiama principio di causalità, cioè il fatto che un evento sia collegato ad un altro attraverso una relazione temporale.

Capito cosa voglio dire? Senza rendercene conto abbiamo applicato un principio che non sapevamo nemmeno di conoscere, ma che in un certo senso si trova già dentro la nostra testa.

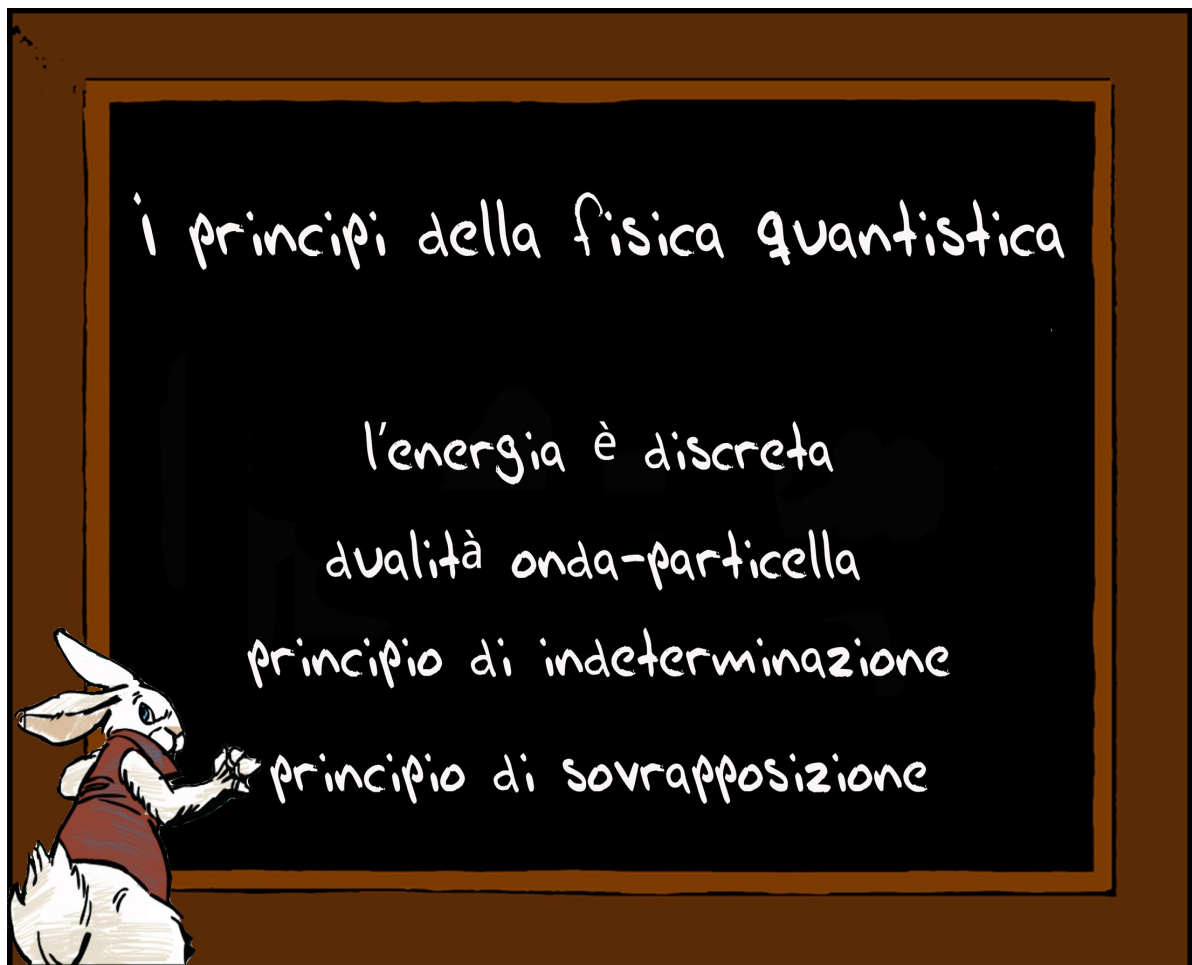
Io stessa in questo viaggio, sono stata costretta a fare i conti e a rivedere questo e altri principi e regole che non sapevo neanche di possedere ma che, mi sono resa conto, sono nell'esperienza di tutti noi.

I PRINCIPI FONDAMENTALI DELLA FISICA QUANTISTICA



Ed eccoci, è arrivato il momento di illustrarvi i famosi principi di cui non faccio altro che parlare ultimamente!

E come farebbe una brava maestra li scriverò sulla lavagna, in modo che non li dimentichiate facilmente.





LE PROPRIETÀ DELLA MATERIA SONO QUANTIZZATE

Tutte le proprietà della materia, come la carica elettrica, la massa e anche l'energia non sono continue, ma si presentano in piccole unità dette quanti.



DUALITÀ ONDA-PARTICELLA

Le particelle elementari, come elettroni e fotoni, si comportano in realtà sia come particelle che come onde.



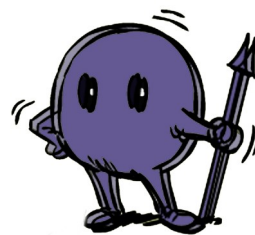
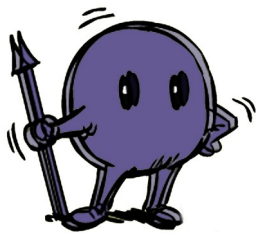
PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE:

È fisicamente impossibile conoscere alcune grandezze incompatibili tra loro (come la posizione che la velocità di una particella) contemporaneamente. Più precisamente una è nota, meno precisa è la misurazione dell'altra.



PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE:

Le particelle possono trovarsi in una sovrapposizione di tutti gli stati in cui potenzialmente possono stare.



Oltre a questi quattro principi esiste uno stranissimo fenomeno. Alcune particelle che stanno a contatto per un certo periodo diventano correlate. Qualunque cosa accada a una delle due, l'altra lo verrà a sapere *istantaneamente*. Questo fenomeno si chiama **entanglement**.



1) L'energia è discreta

La prima scoperta, come abbiamo visto, fu fatta per l'energia, ma in realtà tutte le grandezze che possono essere misurate, quindi anche l'energia, non hanno una forma continua ma sono costituite da minuscoli concentrati detti **quanti**. Gli scienziati usano la parola "discreta" in opposizione alla parola "continua". Immaginiamo di dover riordinare la nostra stanza ma ci sentiamo troppo stanchi per farlo, una buona merenda è quello che ci serve! Ci fornirà l'energia per metterci a lavoro. Un boccone ci permette di ordinare le costruzioni, un altro boccone per raccogliere i colori e così via. Nel nostro esempio i bocconi sono i quanti di energia.

2) dualità onda particella

Le particelle hanno una duplice natura: ondulatoria e corpuscolare, cioè possono essere sia onde che particelle. Per essere più precisi fin quando le particelle non vengono osservate si comportano come onde ma, quando proviamo a misurarle, cioè a vedere dove si trovano, diventano particelle.

Secondo un'altra versione, le particelle viaggiano sempre con la loro onda, sono particelle ed onde nello stesso tempo

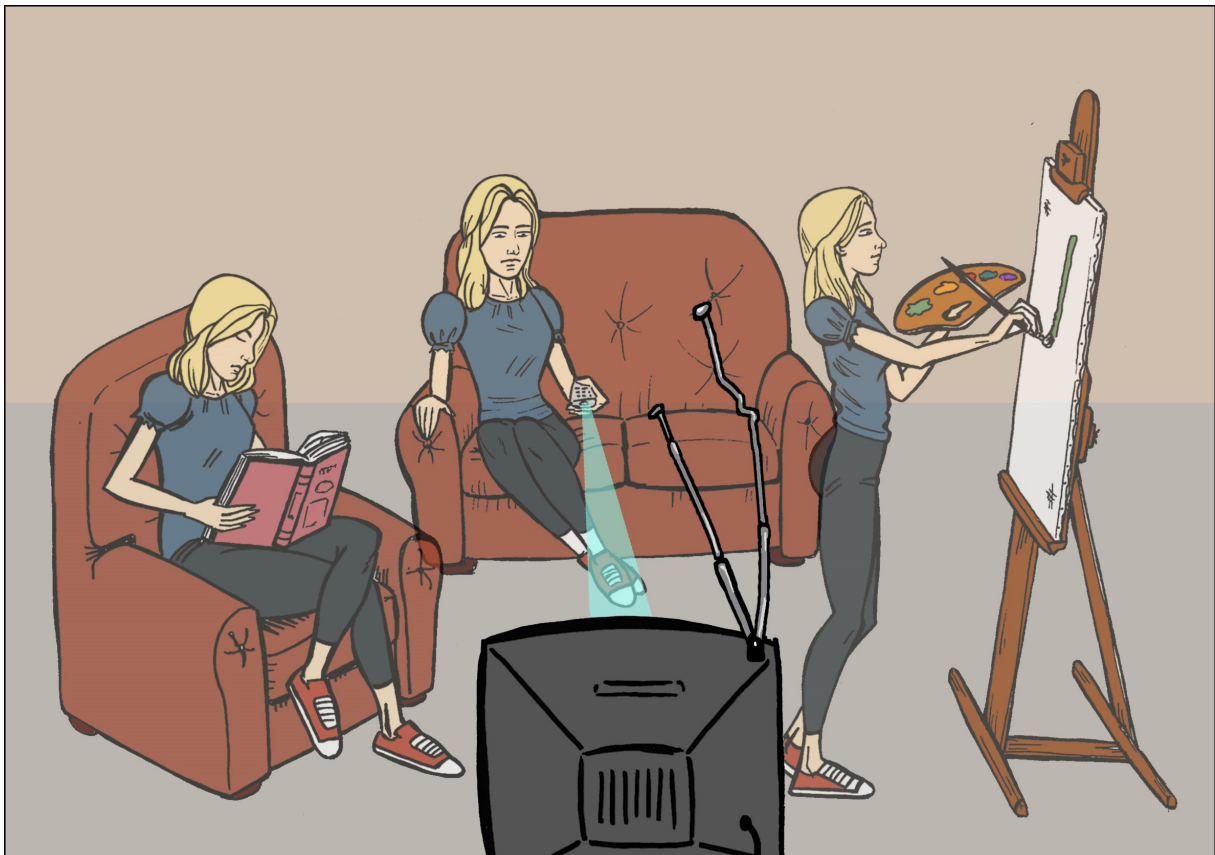
3) Principio di indeterminazione

Esistono delle grandezze incompatibili tra loro, cioè che non possiamo conoscere simultaneamente con precisione arbitraria. Una delle coppie di grandezze incompatibili sono la velocità e la posizione di una particella: quanto maggiore è l'accuratezza nel determinarne la posizione tanto minore è la precisione con la quale si può accertarne la velocità e viceversa.

Questa proprietà è conosciuta come principio d'Indeterminazione e fu scoperta da Werner Heisenberg, fisico tedesco premio Nobel nel 1932.

4) Principio di sovrapposizione

Cosa afferma questo strano principio? Semplice...si fa per dire! Immaginiamo di essere chiusi nella nostra cameretta, di pomeriggio dopo aver fatto i compiti. Cosa potremmo fare? Beh, potremmo leggere un bel libro, guardare la TV, dipingere un bel quadro e tante altre cose. Il principio di sovrapposizione afferma che fin quando non viene misurato, per esempio fin quando qualcuno non bussa ed apre la porta della nostra stanza, il sistema si trova in una sovrapposizione di tutti gli stati possibili. Ciò vuol dire che se siamo soli nella nostra stanza e nessuno ci disturba venendo a controllare che facciamo, noi facciamo contemporaneamente tutto quello che potenzialmente potremmo fare! Assurdo, eh? Eppure le particelle che studia la fisica quantistica si comportano esattamente in questo modo.

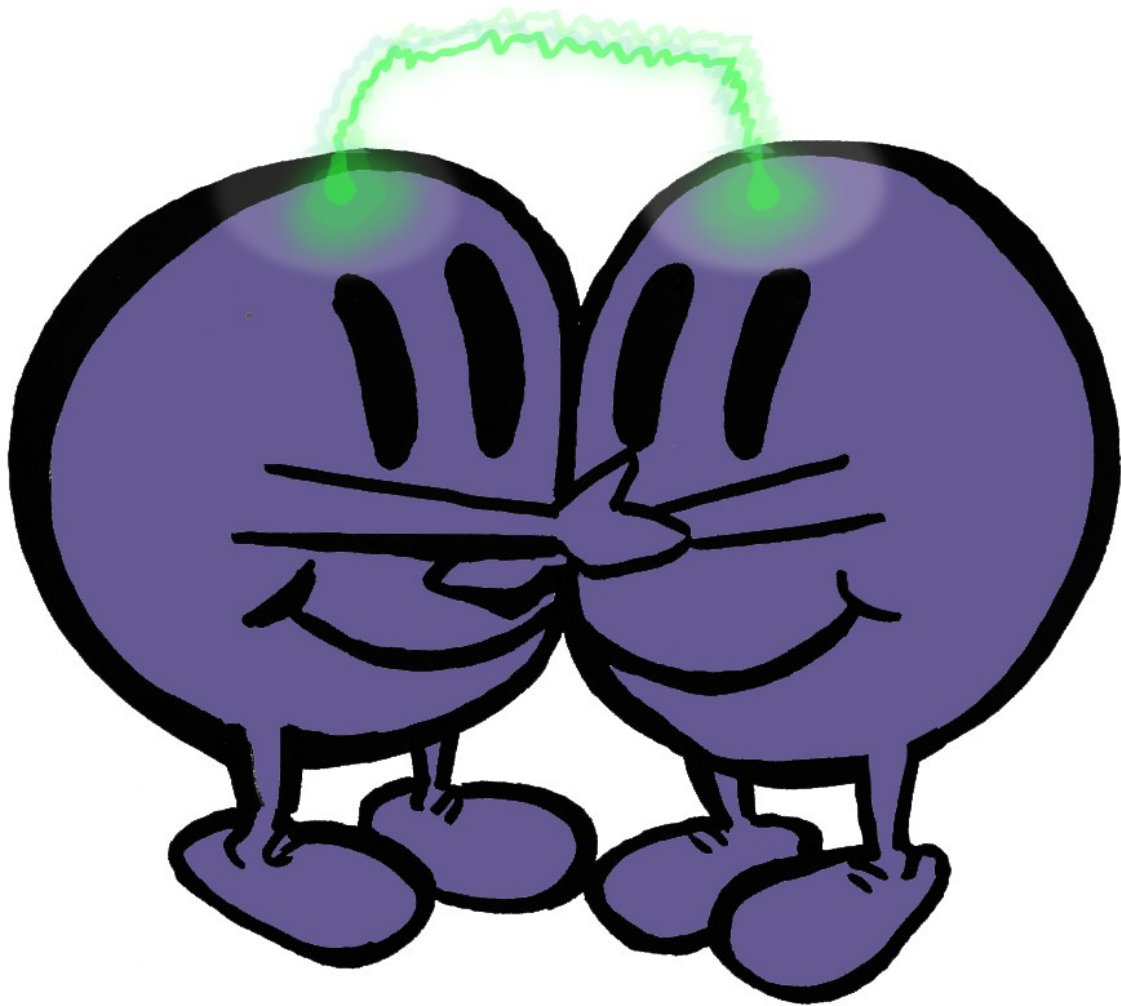


Finché nessuno viene a disturbarci e siamo chiuse nella nostra cameretta, secondo la fisica quantistica facciamo contemporaneamente tutte le cose che potremmo fare!

Entanglement

Innanzitutto partiamo dal termine: "entanglement" è un termine inglese che in italiano si traduce, secondo il suggerimento del fisico Rasetti, come "intreccio", "correlazione". L'entanglement è un fenomeno che può crearsi tra due o più particelle. È come un vincolo, una intesa nascosta che si crea se le particelle interagiscono. Quando verranno separate, a qualsiasi distanza si trovino l'una dall'altra rimangono "in contatto", correlate. Se proviamo ad effettuare una misura su una particella, l'altra – che si trova lontano da noi – risentirà istantaneamente della misura e cambierà il suo stato.

Come vedremo più avanti è il fenomeno che più di tutti è risultato per molti decenni incomprensibile perché sembrava violare degli importanti principi, come il principio di causalità, di cui vi ho già raccontato, e il principio di località.





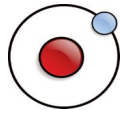
dualità onda-particella

PRINCIPIO DEL
TERZO ESCLUSO

SPIEGAZIONE
CASO LUCE

ESPERIMENTO
DOPPIA
FENDITURA

IL PRINCIPIO DEL TERZO ESCLUSO, LA DUALITÀ ONDA PARTICELLA E LO STRANO CASO DELLA LUCE



Cercherò ora di raccontarvi quello che mi è stato spiegato nel mondo dei quanti riguardo la strana ambivalenza che caratterizza i suoi particolari abitanti.

Le particelle hanno una duplice natura, corpuscolare e ondulatoria



Già questo è un po' strano, insomma, una cosa o è un corpuscolo o è un'onda!

Non vi nego che anche io sono rimasta un po' incredula. Nel nostro mondo, pensavo tra me e me, sarebbe impossibile una cosa del genere. Da noi è tutto chiaro e determinato. Un gatto nero, ad esempio, è un gatto nero, non può mica essere un gatto nero o un gatto striato! Sarebbe completamente illogico!

Ma, dopo tutte le chiacchierate fatte con gli strani personaggi incontrati in quel mondo, dopo le tutte le domande che ho posto e le risposte che ho ricevuto, ho cominciato a riflettere su una cosa e sono giunta a una conclusione: sapete perché ci sembrano così strane queste affermazioni? Perché, anche se non ce ne rendiamo conto, il nostro cervello quando pensa e ragiona è abituato ad applicare un principio della "logica tradizionale":

il principio del terzo escluso

Il filosofo greco Aristotele, nell'opera *Metafisica*, fu il primo ad enunciare questo principio semplice e fondamentale. Il principio del terzo escluso afferma che:



una proposizione P è o vera o falsa



non ci sono altre possibilità eccetto queste due.
L'affermazione "questo gatto è nero" non può che ammettere una sola risposta, a seconda che il gatto sia o meno effettivamente nero: è vera o è falsa.



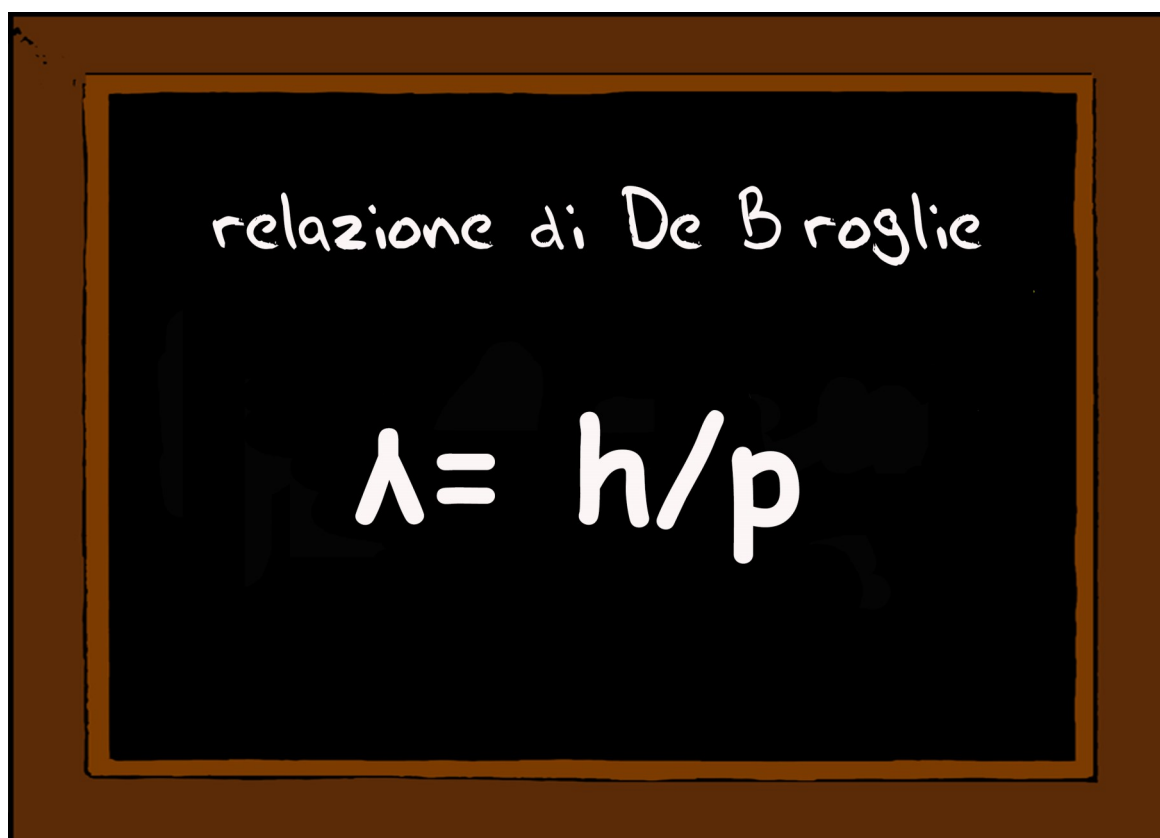
In fisica quantistica le cose funzionano diversamente.

Le particelle subatomiche vivono in un mondo talmente lontano dal mondo a cui siamo abituati, che non bisogna sorprendersi che obbediscano a leggi diverse.

Se affermiamo che l'elettrone è una particella e non è una particella oppure che l'elettrone è un'onda e non è un'onda non commettiamo alcun errore logico.

Perché in effetti tutte le particelle subatomiche si comportano a volte come se fossero corpuscoli, a volte come se fossero onde.

Gli scienziati all'inizio non capivano questo strano comportamento finché uno di essi non ebbe il classico colpo di genio. Cambiò punto di vista e avanzò l'idea che in realtà questi comportamenti fossero manifestazioni diverse ma compatibili dello stesso fenomeno, due facce della stessa medaglia. La materia forse poteva davvero manifestarsi in questi due modi.



relazione di De Broglie

$$\lambda = h/p$$

Ad intuire la duplice natura, corpuscolare ed ondulatoria della materia, stabilendo così una relazione tra le onde e le particelle, fu il matematico e fisico Louis De Broglie che ottenne, per questo, il premio Nobel, il premio più prestigioso che uno scienziato possa ricevere, nel 1929.



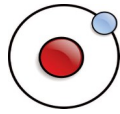
Ma il fatto curioso non si ferma solo alla duplice natura della particelle, va ben oltre. Se una particella può essere due cose, non decide cosa essere, le piace essere tutto contemporaneamente! Per essere più precisi le particelle si comportano come onde finché non vengono osservate (cioè misurate), ma appena cerchiamo di misurarle diventano particelle. Fino a quando la particella non arriva dove deve, non si trova mai in un punto preciso dello spazio, ma si distribuisce in una sorta di onda, occupando tutto lo spazio che potenzialmente può occupare e si propaga ovviamente come un'onda e non secondo la traiettoria classica definita delle particelle. Una volta che la particella arriva sul bersaglio rivela la sua essenza di particella e noi la vediamo nella sua natura corpuscolare.



Se una particella non viene misurata, si comporta come un'onda.

Appena cerchiamo di vedere dove si trova diventa particella!

Lo strano caso della luce



Uno dei misteri che è stato svelato grazie agli studi di Louis de Broglie e di altri scienziati che si occupavano di fisica quantistica è stato lo strano caso della luce.

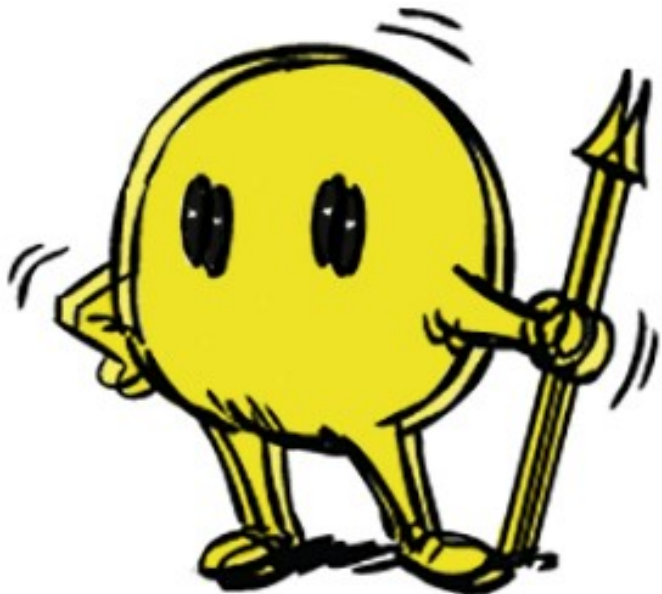
All'inizio del XX secolo esistevano due teorie, entrambe validissime, che spiegavano il comportamento della luce:

la teoria corpuscolare e la teoria ondulatoria.

Uno dei più importanti sostenitori della teoria corpuscolare era Isaac Newton. Secondo questa teoria, la luce era come composta da piccole particelle di materia (corpuscoli) emesse in tutte le direzioni. Oltre che essere matematicamente molto semplice questa teoria spiegava molto facilmente alcune caratteristiche della propagazione della luce che erano ben note all'epoca di Newton.

I colori dell'arcobaleno, ad esempio, venivano spiegati tramite l'introduzione di un gran numero di corpuscoli di luce diversi (uno per ogni colore) ed il bianco era pensato come formato da tante di queste particelle.

La teoria ondulatoria invece venne formulata da Christiaan Huygens



nel 1678. La luce veniva vista come un'onda che si propaga, esattamente come le onde del mare o quelle acustiche, in un mezzo, chiamato etere. L'etere si pensava fosse una sostanza presente in tutto l'universo e fosse formato da microscopiche particelle elastiche. La teoria ondulatoria della luce permetteva di spiegare, anche se in maniera matematicamente complessa, un gran numero di comportamenti della luce, come la riflessione e la rifrazione [GUARDA IL RIQUADRO], che sono fenomeni tipici delle onde.

Nel 1801 Thomas Young dimostrò inoltre come i fenomeni della diffrazione e dell'interferenza fossero interamente spiegabili dalla teoria ondulatoria e non lo fossero dalla teoria corpuscolare.

Quindi, come vedete, la situazione della luce era abbastanza ingarbugliata: che cos'è la luce? Un'onda o tante particelle?

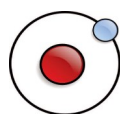
Beh, ora la risposta è semplice anche se strana...

LA LUCE È ENTRAMBE LE COSE!

QUANDO UN RAGGIO DI LUCE CHE VIAGGIA, PER ESEMPIO, NELL'ARIA, E POI INCONTRA SUL SUO CAMMINO UN ALTRO MEZZO COME L'ACQUA, SI DIVIDE NORMALMENTE IN DUE RAGGI: UNO VIENE RIFLESSO DALLA SUPERFICIE E L'ALTRO ENTRA NEL SECONDO MEZZO CAMBIANDO LA SUA DIREZIONE, CIÒ È VIENE RIFRATTO

QUANDO LA SUPERFICIE INCONTRATA È PERFETTAMENTE RIFLETTENTE, NON SI HA RIFRAZIONE E LA LUCE VIENE COMPLETAMENTE RIFLESSA, SEGUENDO LE LEGGI DELLA RIFLESSIONE CARATTERISTICHE DELLE ONDE.

ESPERIMENTO DELLA DOPPIA FENDITURA



Ma ora torniamo alle nostre particelle, e alla strana proprietà che presentano, cioè la loro duplice natura.

Questa importante caratteristica delle particelle è stata dimostrata sperimentalmente attraverso un esperimento che è diventato celebre nella storia della fisica, conosciuto come **esperimento della doppia fenditura**.

Gli scienziati hanno appurato che se indirizziamo un fascio di elettroni verso una superficie con due sottili fenditure, al di là delle fenditure otteniamo figure di interferenza e diffrazione del tutto analoghe a quelle prodotte dalle onde.

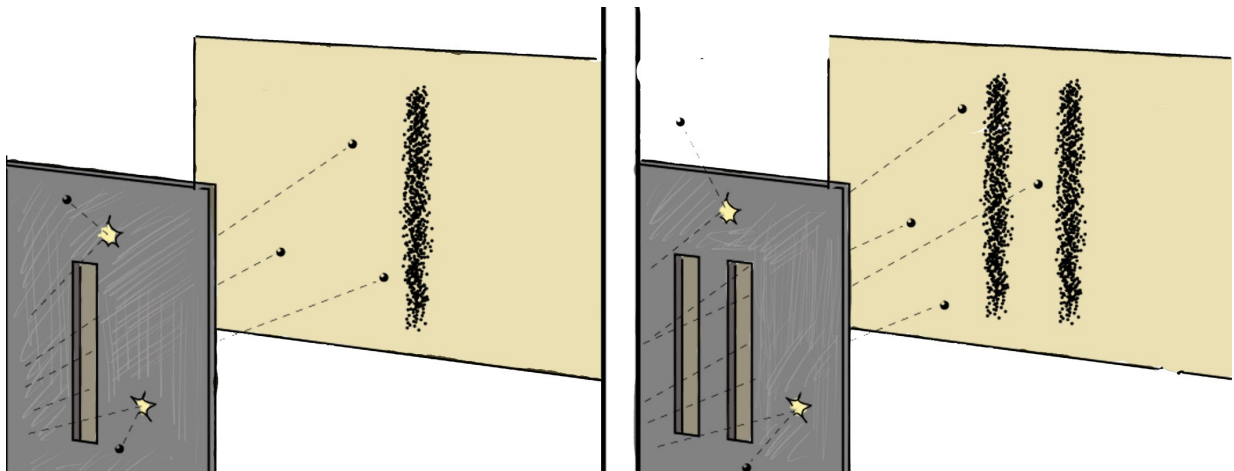
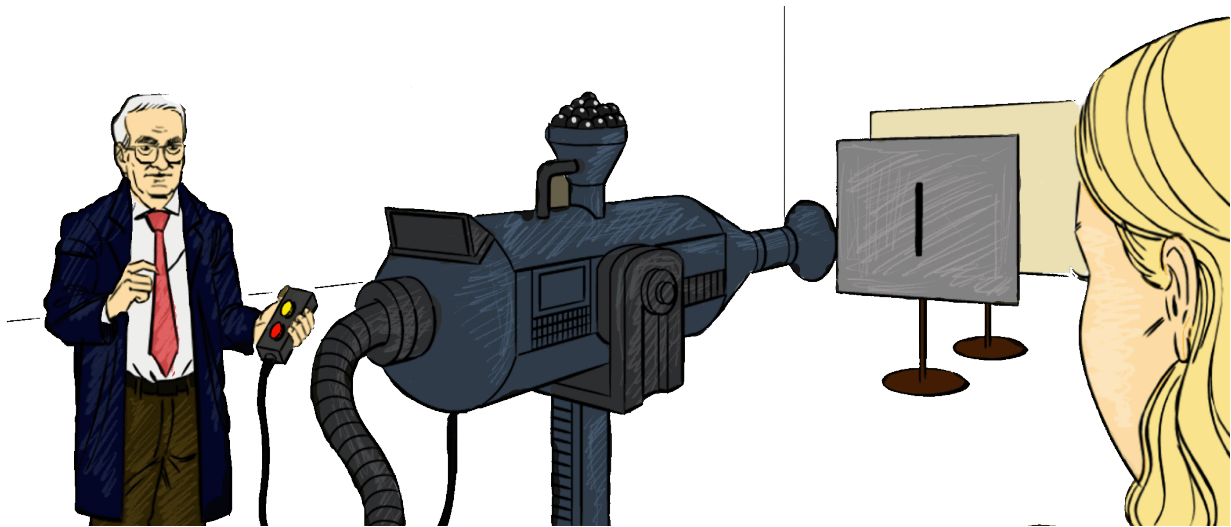
Nel mondo dei quanti l'esperimento mi è stato illustrato nei minimi particolari da uno scienziato molto paziente. Mi ha mostrato innanzitutto il comportamento di oggetti corpuscolari e di onde d'acqua mentre passano prima per una fenditura e poi per due.

ANCHE LA DIFFRAZIONE E L'INTERFERENZA SONO DUE FENOMENI CHE RIGUARDANO LE ONDE E CHE LA LUCE MANIFESTA.

SIA L'INTERFERENZA CHE LA DIFFRAZIONE COMPORTANO UNA MODIFICA DELLA TRAIETTORIA DI PROPAGAZIONE DI UN' ONDA. IN PARTICOLARE:

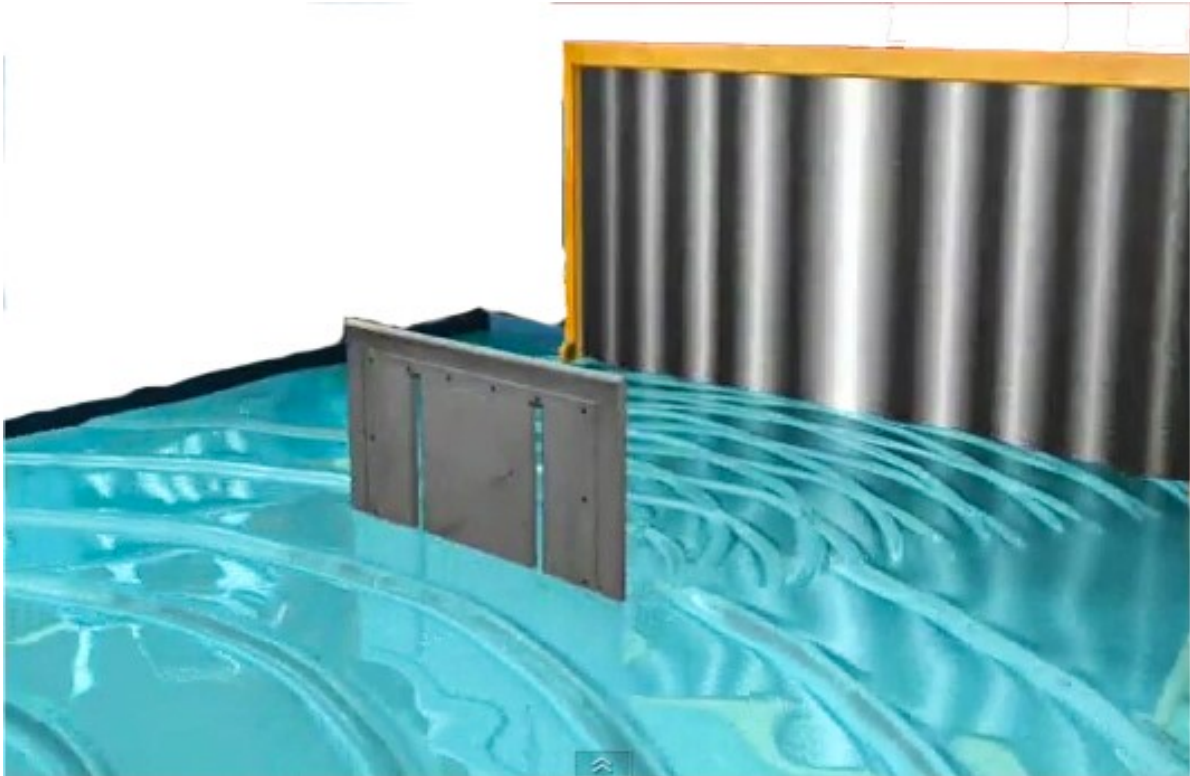
LA DIFFRAZIONE SI HA QUANDO UN OGGETTO MODIFICA IL CAMMINO DELL'ONDA

L'INTERFERENZA AVVIENE QUANDO DUE ONDE SI SOVRAPPONGONO E QUINDI VIENE MODIFICATA LA TRAIETTORIA ORIGINALE.



poi abbiamo analizzato il comportamento degli elettroni e posso assicurarvi che è proprio come diceva...Se spariamo un singolo elettrone contro una lastra con due fenditure non è possibile stabilire attraverso quale delle due aperture è passato né determinare la traiettoria seguita dalla particella prima di raggiungere lo schermo.

La meccanica quantistica non fornisce certezze, ma assegna semplicemente la probabilità di trovare la particella in un punto o in un altro dello spazio.



Per sapere dove effettivamente si trova l'elettrone dovremo, invece, effettuare una misura, processo in cui l'elettrone manifesta la sua natura di particella.

Tuttavia nelle misurazioni condotte sui fenomeni a livello atomico esistono grandezze, come la posizione e la velocità, che non si possono determinare contemporaneamente. L'esattezza con cui si misura l'una influenza l'imprecisione che si commette nel determinare l'altra. Questo fatto è noto come principio di indeterminazione...ma questo è un altro capitolo!



PRINCIPIO di INdeterMINAZIONE

DETERMINISMO

PROBABILITA'

LA PROBABILITA' E IL PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE



Avete mai fatto caso a quello che succede se guardate attraverso il vetro di una finestra? A me è successo moltissime volte, ma ci ho riflettuto solo dopo aver parlato con uno scienziato incontrato nel mondo dei quanti. Vi siete mai resi conto che si vede non solo il paesaggio esterno ma spesso anche la propria immagine, più o meno nitidamente?



Beh, anche se vi sembrerà strano, questo fenomeno è in realtà uno straordinario esempio per entrare direttamente in contatto con il mondo dei quanti, dove è il concetto di **probabilità** che detta legge!

Ed è proprio la probabilità la causa di questo fenomeno.

Perché vediamo sia la nostra immagine che quello che c'è attraverso il vetro? Quello che succede è che ogni fotone di cui è composta la luce, colpendo il vetro può attraversarlo per mostrare il paesaggio, ma può anche esserne riflesso: il fotone ha una certa probabilità di passare o meno attraverso il vetro.

Nel gioco dei dadi il ruolo della probabilità è subito evidente.

Che probabilità abbiamo che, tirando il dado, esca il numero 6?



La probabilità di un evento =

numero di casi favorevoli / numero di casi possibili



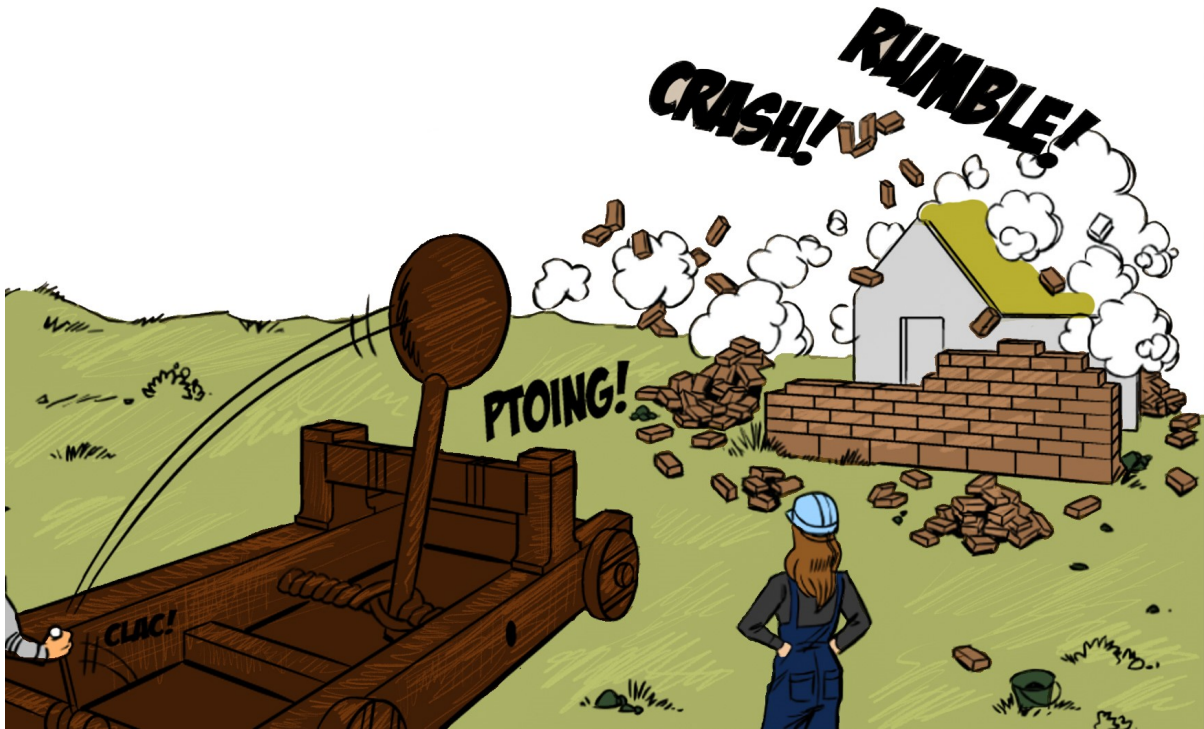
Nel nostro esempio, il numero di casi favorevoli è 1, mentre il numero di casi possibili è 6, quante sono le facce del dado. Quindi la possibilità che, tirando il dado, esca il numero 6 è $1/6$.

Questo, però, non esclude che il 6 compaia ad ogni lancio, o che non compaia per 10 lanci di seguito.

La probabilità sembra essere una cosa molto importante nella fisica quantistica. In tutte le chiacchierate fatte con i personaggi incontrati nel mondo dei quanti, ricorre spesso questa parola:



La probabilità di costruire una casa



La probabilità di prendere la strada giusta

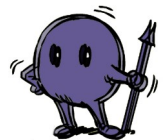




La probabilità di passare attraverso la porta



MA PERCHÉ IN FISICA QUANTISTICA CI SONO SEMPRE PROBABILITÀ E MAI CERTEZZE?



I fisici non potrebbero mettersi comodi e fare le cose per bene, come succede nel nostro mondo, e spiegare dettagliatamente dove, ad esempio, si trova un elettrone?

Qual è la differenza, in questo caso, tra la fisica classica e la fisica quantistica?

La fisica classica è fondata sull'idea che la natura segua delle leggi ben precise, per usare la parola appropriata **“DETERMINISTICHE”** [**LEGGI IL RIQUADRO**], che spiegano in maniera impeccabile tutti i fenomeni.

CHE COS'È IL DETERMINISMO?

IL DETERMINISMO È UNA CONCEZIONE CHE ESCLUDE QUALSIASI FORMA DI CASUALITÀ NELLE COSE E INDIVIDUA UNA SPIEGAZIONE DI TIPO FISICO PER TUTTI I FENOMENI, RICONDUCENDOLA ALLA CATENA DELLE RELAZIONI CAUSA-EFFETTO OVVERO AL PRINCIPIO DI CAUSALITÀ. LA PRINCIPALE CONSEGUENZA È CHE DATE DELLE CONDIZIONI INIZIALI TUTTO QUEL CHE ACCADRÀ NEL FUTURO È PREDETERMINATO IN MODO UNIVOCO DALLE LEGGI FISICHE DELL'UNIVERSO.

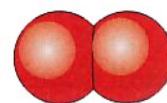
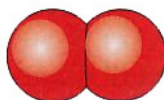
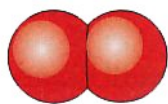
Se si hanno conoscenze sufficienti circa un corpo, un'onda luminosa o un qualsiasi sistema ad un dato istante - in fisica si usa dire "stato iniziale di un sistema" - il loro comportamento futuro (ed anche il passato) è calcolabile esattamente. Non ci sono problemi nella determinazione della traiettoria percorsa dalla Luna o dai pianeti nel cielo; è possibile costruire un palazzo o un ponte ed essere sicuri che non crolli.

Alla metà del XIX° secolo si riteneva che il metodo deterministico di indagine costituisse l'essenza stessa della fisica; e potesse cioè permettere di risolvere ogni tipo di problema, anche i più complessi.

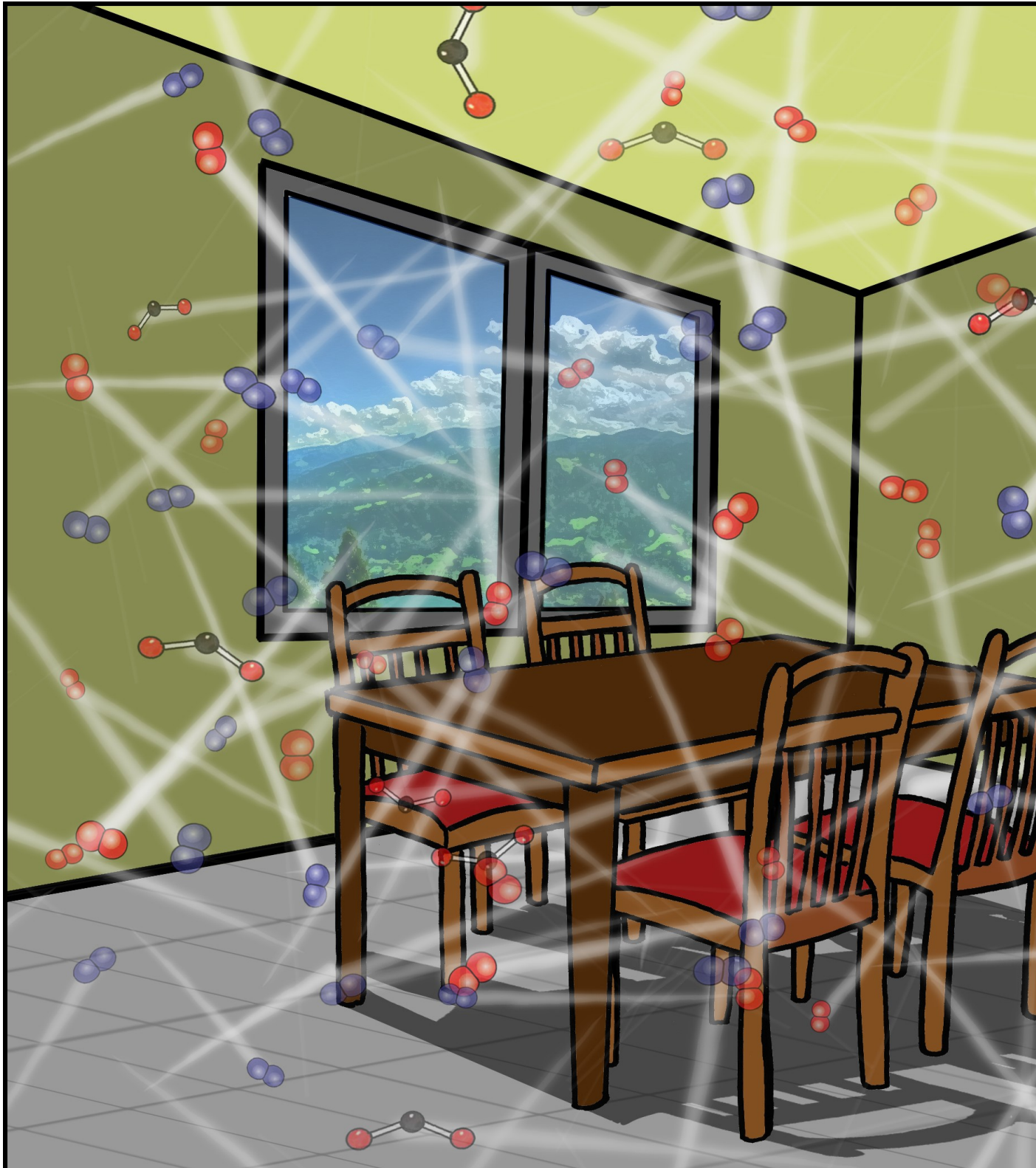
Ad un certo punto però accadde che due grandi fisici, James Clerk Maxwell e Ludwig Boltzmann, studiando il comportamento dei gas, si resero conto che il metodo deterministico non sempre era applicabile.



Un gas, come l'aria che respiriamo, è composto da un'enorme quantità di particelle che si muovono rapidamente in ogni direzione rimbalzando sulle pareti del contenitore in cui si trova. Se volessimo applicare il metodo meccanicistico alla descrizione del moto delle particelle dovremmo misurare in tempi brevissimi la posizione iniziale e le velocità di 6×10^{23} (numero di Avogadro) particelle per cm^3 ! Credetemi, è un numero talmente grande che non saprei neanche pronunciarlo!



Stesso discorso vale per il gioco; nel gioco dei dadi ad esempio, non possiamo riuscire a prevedere con precisione quando, tirando due dadi, uscirà il numero 11, oppure quando, alla roulette la pallina cadrà sul 25 rosso.



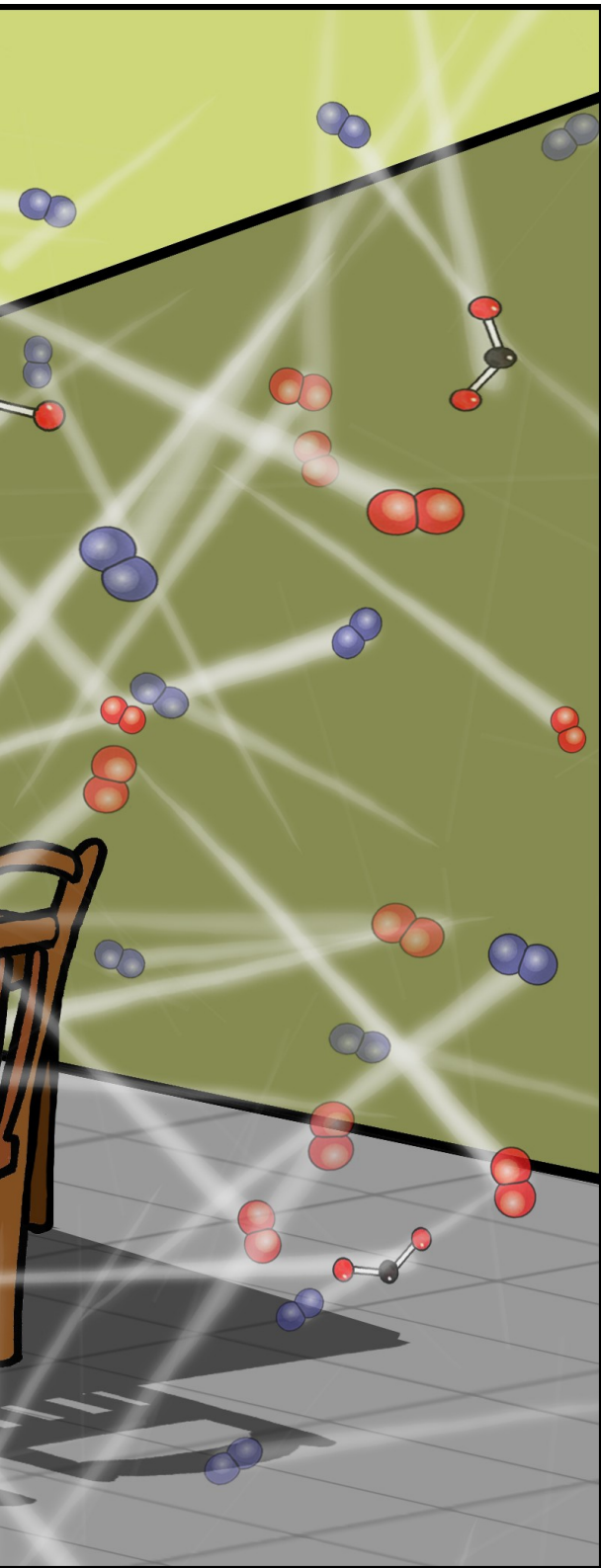
In questi casi, e in altri casi, anche in fisica classica si ricorre al concetto di

PROBABILITÀ

su cui si fonda il

METODO STATISTICO.

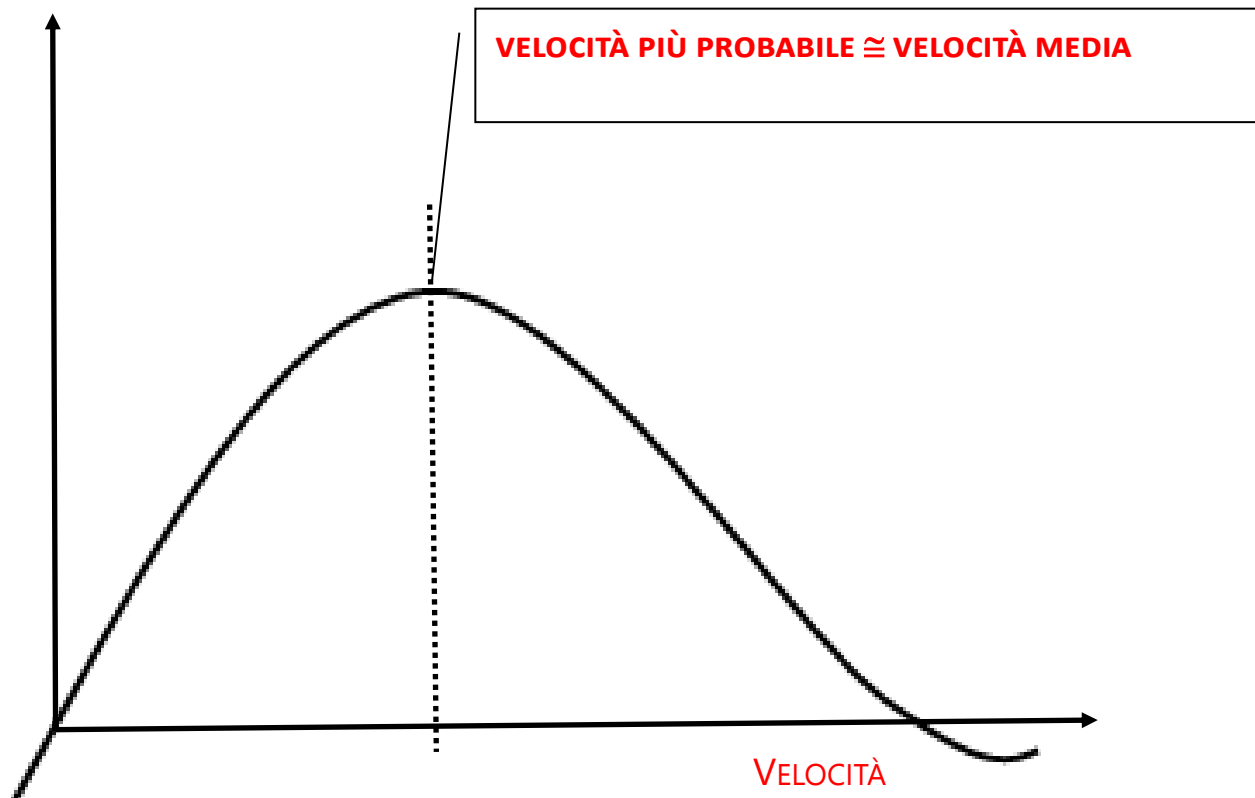
Il metodo statistico, a differenza del metodo deterministico, non richiede la conoscenza dettagliata delle condizioni iniziali di ogni singola particella. Naturalmente, dobbiamo pagare un prezzo corrispondente a questa non conoscenza degli stati iniziali e questo è da riscontrarsi nel fatto che non possiamo prevedere lo stato finale del sistema. Quello che potremo fornire saranno soltanto probabilità, o valori medi, che caratterizzano l'intero sistema di cui ci stiamo occupando.



L'aria che respiriamo contiene un numero di particelle così alto che non è possibile neanche immaginare!

Ad esempio potremmo tracciare un grafico così:

PROBABILITÀ



Non possiamo conoscere qual è la velocità di una singola particella, siamo però in grado di dire qual è la velocità più probabile, cioè la velocità che noi misureremmo se facessimo l'esperimento tante volte.

Pertanto, la situazione agli inizi del XX° secolo era questa: quando si considerano pochi corpi si usano i metodi deterministici e quando il sistema è costituito da un numero di oggetti molto alto si utilizzano i metodi statistici, che ci permettono di ottenere risultati sul futuro di un sistema in modo meno esatto e completo.

Questo fatto ci porta a un punto critico.

La probabilità del mondo macroscopico e nella fisica classica è una PROBABILITÀ DI IGNORANZA;

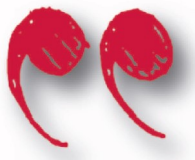
l'unica ragione per cui non può essere calcolata in anticipo la casella nella quale va a finire la pallina di una roulette è l'ignoranza di quelle che il fisico chiama "condizioni iniziali".

Se il giocatore conoscesse ogni particolare meccanico della ruota, le dimensioni, la massa e la velocità di lancio della pallina, la legge degli attriti nei supporti, egli potrebbe in linea di principio prevedere il risultato del lancio. Così come potrebbero 10^{23} ultraveloci e meticolosi sperimentatori prevedere la posizione delle molecole del gas contenuto in un recipiente della capacità di 1cm^3 .

E invece che ruolo ha la probabilità in fisica quantistica?

Ricorriamo all'uso della probabilità quando non conosciamo le condizioni iniziali, come accade per la fisica classica?

La risposta è un secco e deciso no!



La probabilità è un concetto fondamentale
per studiare il mondo microscopico

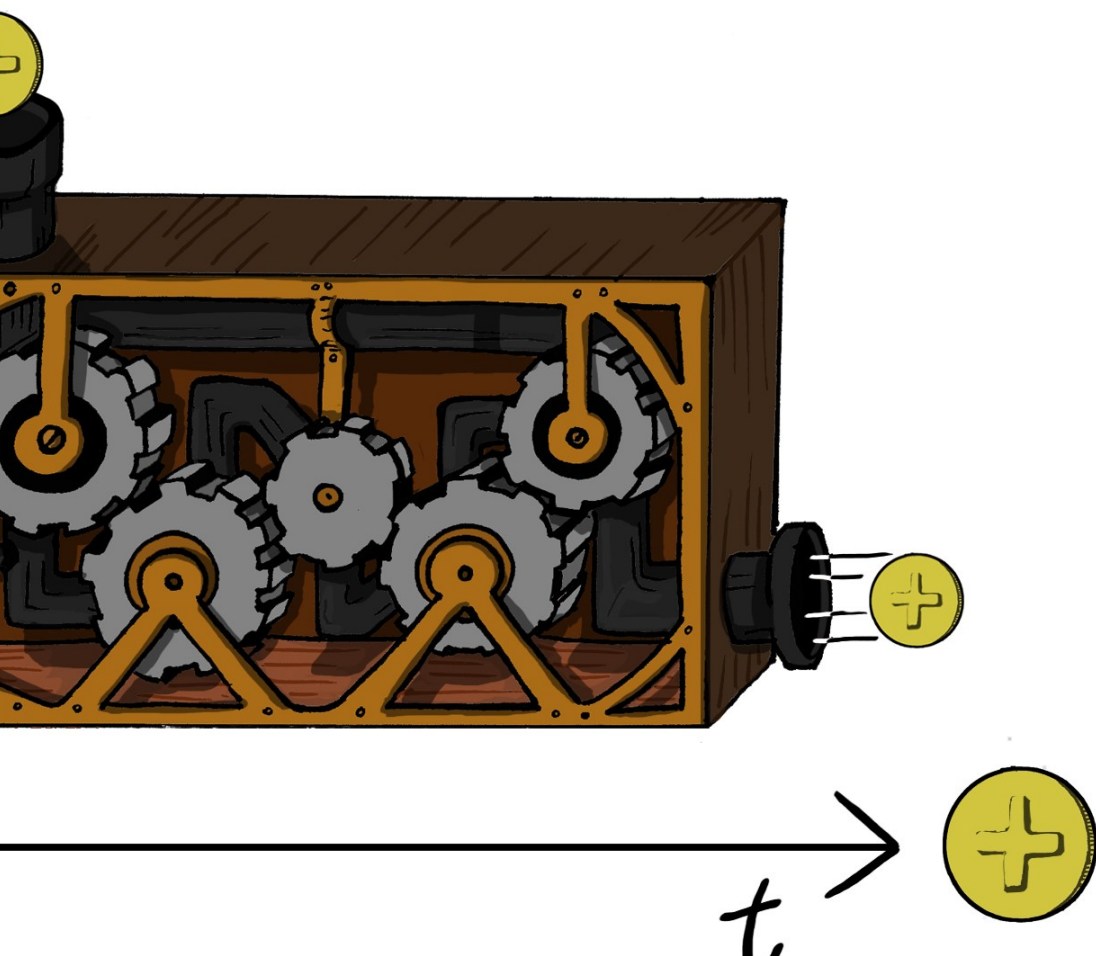


Anche se conoscessimo precisamente le condizioni iniziali di un sistema non potremmo, neanche il linea teorica, conoscere tutte le proprietà del sistema che stiamo studiando.

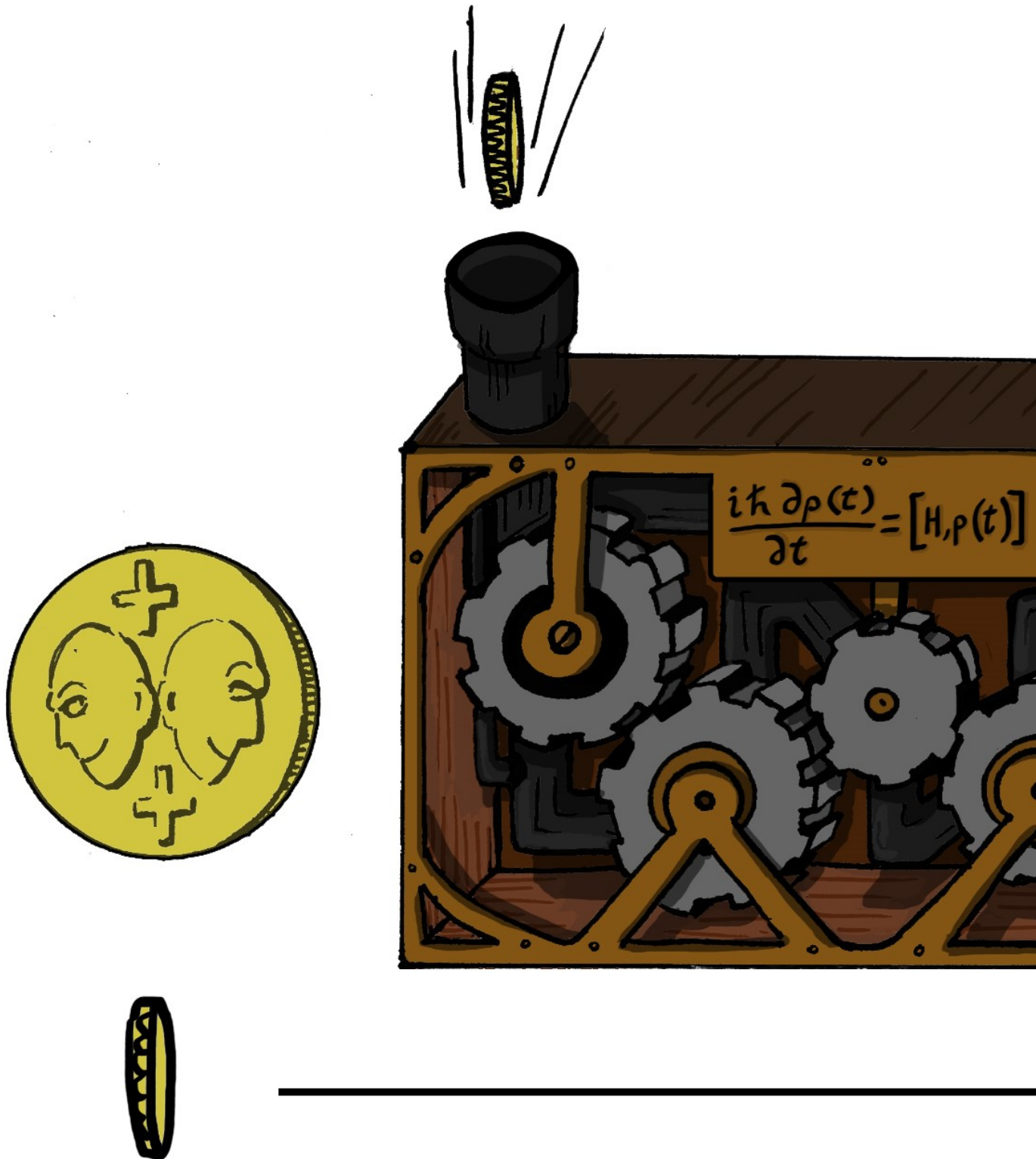
Secondo la meccanica quantistica, si possono conoscere tutti i fatti possibili che ci sono da conoscere su un fotone e non essere in grado di prevedere dove esso possa trovarsi ad un dato istante.



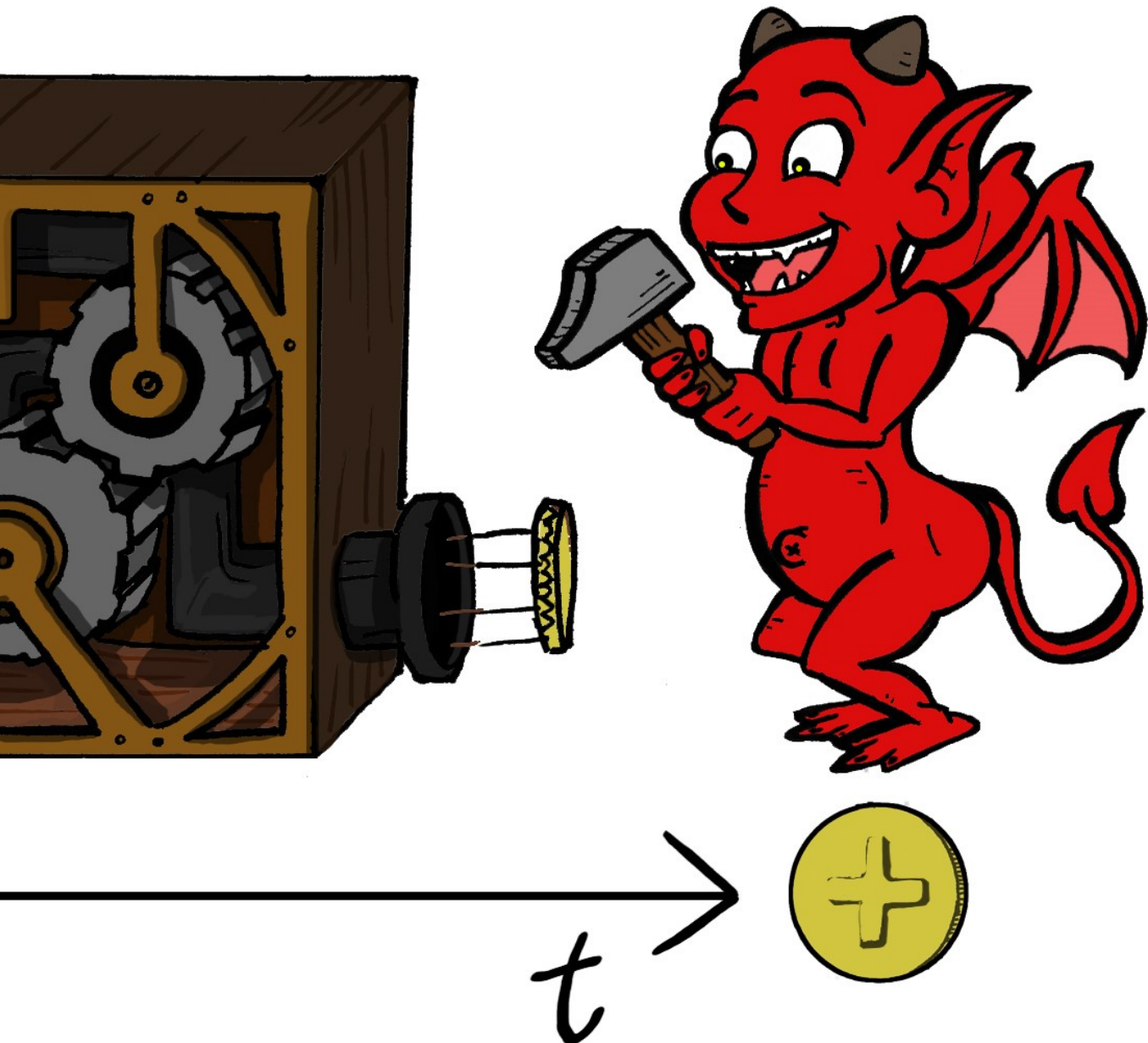
Se seguiamo le leggi della fisica classica, il lancio della moneta può essere metaforicamente rappresentato come una macchina in cui gli ingranaggi sono le leggi della fisica classica. La moneta che stiamo lanciando (lo stato iniziale del sistema) potrà essere rappresentata come un punto nel sistema di coordinate.



...i ingranaggi rappresentano le varie forze che agiscono sulla moneta secondo le leggi della fisica . Per cui se conosciamo la faccia della
...emo determinare anche lo stato finale, cioè quale faccia uscirà.

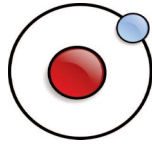


Anche il lancio della moneta quantistica può essere metaforicamente rappresentato come una macchina deterministica

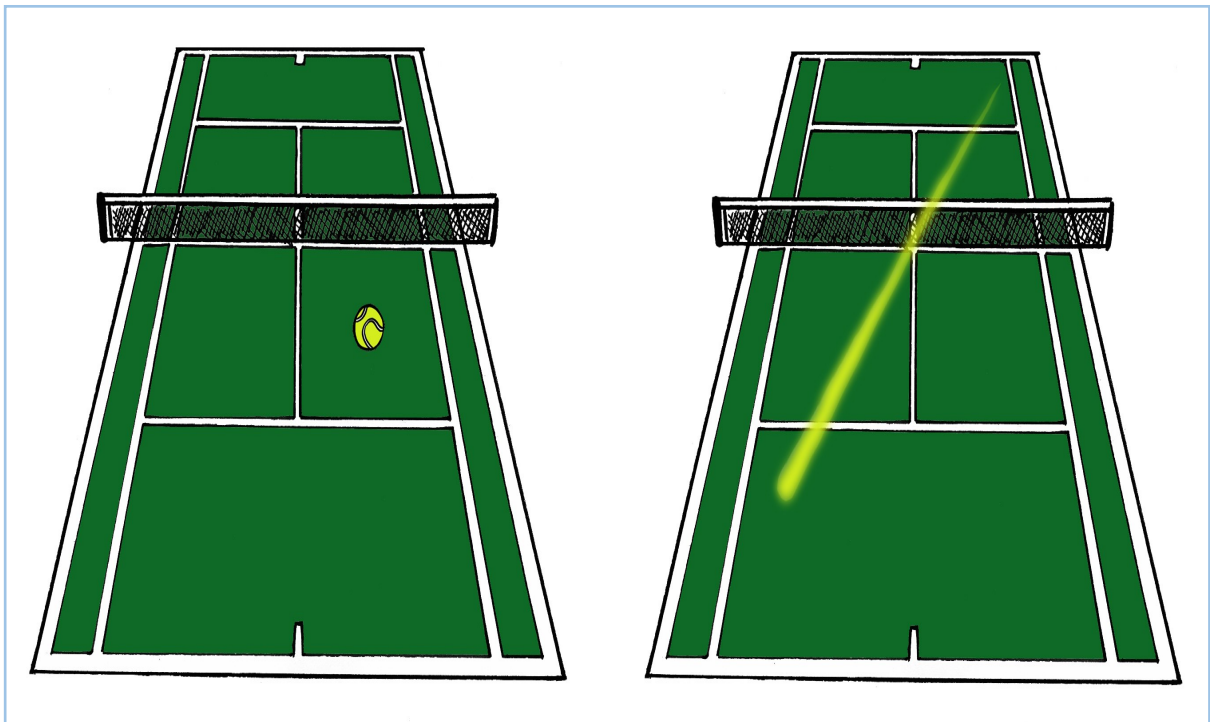


ca. A differenza del caso classico ora il processo di misura, rappresentato dal diavoletto, è un evento probabilistico.

PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE



Alla impossibilità di conoscere con esattezza tutte le proprietà di un sistema è stato dato un nome: PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE. Supponiamo di voler misurare simultaneamente la traiettoria e la posizione di un oggetto in movimento, ad esempio una pallina da tennis in volo. Per mezzo di una fotografia possiamo determinare la sua posizione in un certo istante di tempo. Naturalmente se la palla percorre la propria traiettoria a notevole velocità, la fotografia risulterà mossa a meno che si usi un otturatore ad alta velocità.

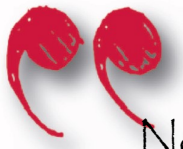


Se vogliamo sapere, attraverso una fotografia, la posizione di una pallina da tennis in movimento, possiamo scattarle una foto con un tempo molto breve, in modo da ottenere la prima figura. Ma come facciamo a stabilire la sua traiettoria? Se invece facciamo una foto con un tempo un po' più lungo conosceremo la traiettoria della pallina, come nella seconda immagine, ma non più la sua posizione!

Più l'oggetto che fotografiamo risulterà "fermato", più velocemente sarà scattato l'otturatore. Ma in questo caso si sarà pagato un prezzo nella definizione della traiettoria risultando la palla da tennis ferma. D'altro canto usando un otturatore a bassa velocità si fotograferà una rappresentazione fedele della traiettoria della palla, ma che non dà alcuna indicazione sulla posizione.

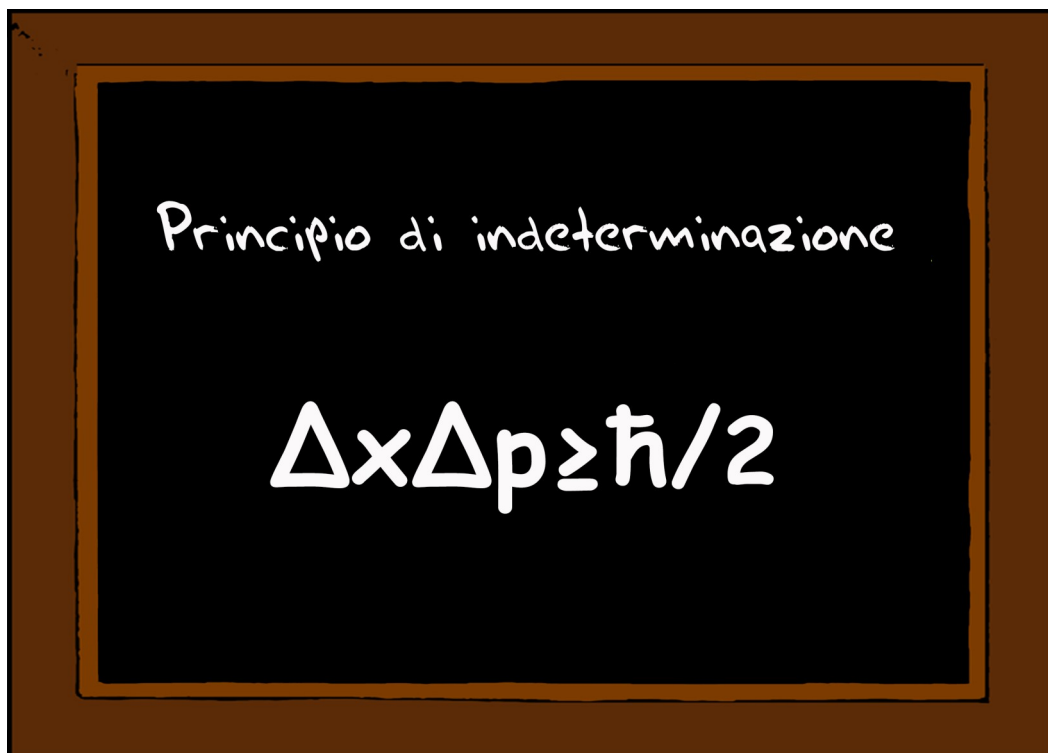
In conclusione, più si tenta di definire la posizione dell'oggetto più si perde informazione sulla traiettoria e viceversa.

L'elettrone che ho incontrato nel mondo dei quanti ha usato questo esempio per spiegarmi il principio di indeterminazione. Formulato nel 1927 dal fisico tedesco Werner Heisenberg, afferma che



Non è possibile conoscere grandezze incompatibili simultaneamente e con precisione arbitraria.



A graphic of a chalkboard with a dark brown border and a black surface. The text is written in white, hand-drawn style.

Principio di indeterminazione

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar / 2$$

Ciò è in netto contrasto con la meccanica classica dove, abbiamo visto, è sempre possibile definire simultaneamente sia la posizione che la velocità di un oggetto e quindi stabilirne la traiettoria.



Perché invece nel mondo dei quanti non è possibile conoscere contemporaneamente queste due grandezze? Questa discrepanza tra mondo macroscopico e mondo microscopico è dovuta al fatto che, per capire dove si trova un elettrone bisogna osservarlo, ma guardare un elettrone con un potente microscopio significa

colpirlo con una particella di luce, un fotone. Un fotone trasporta con sé energia e pertanto perturba la traiettoria se l'oggetto è particolarmente piccolo (come nel caso delle particelle del mondo atomico) cosicché non è possibile effettuare la misura con la precisione elevata. Invece se il corpo ha dimensioni notevoli si possono trascurare gli effetti della luce che serve per illuminarlo!

Quindi nel mondo dei quanti l'atto dell'osservazione modifica le proprietà della particella. Quanto più esattamente viene definita la posizione, tanto meno esattamente si può definire la velocità, e viceversa. L'indeterminazione risulterà sempre maggiore o uguale alla grandezza fisica già incontrata, chiamata "azione" e indicata con h .

Oltre alla posizione e alla velocità della particelle, il principio di indeterminazione pone limiti anche alla misura simultanea di altre grandezze come ad esempio l'energia e il tempo: se si cerca di determinare con precisione l'energia di una particella, diminuirà inevitabilmente il grado di accuratezza con cui conosciamo la sua durata, e viceversa.

Una delle conseguenze del principio di indeterminazione è che un elettrone non si muove attorno all'atomo su una traiettoria ben definita ma tende a muoversi in una certa zona intorno al nucleo, la cui forma dipende principalmente dal livello energetico dell'elettrone, definita

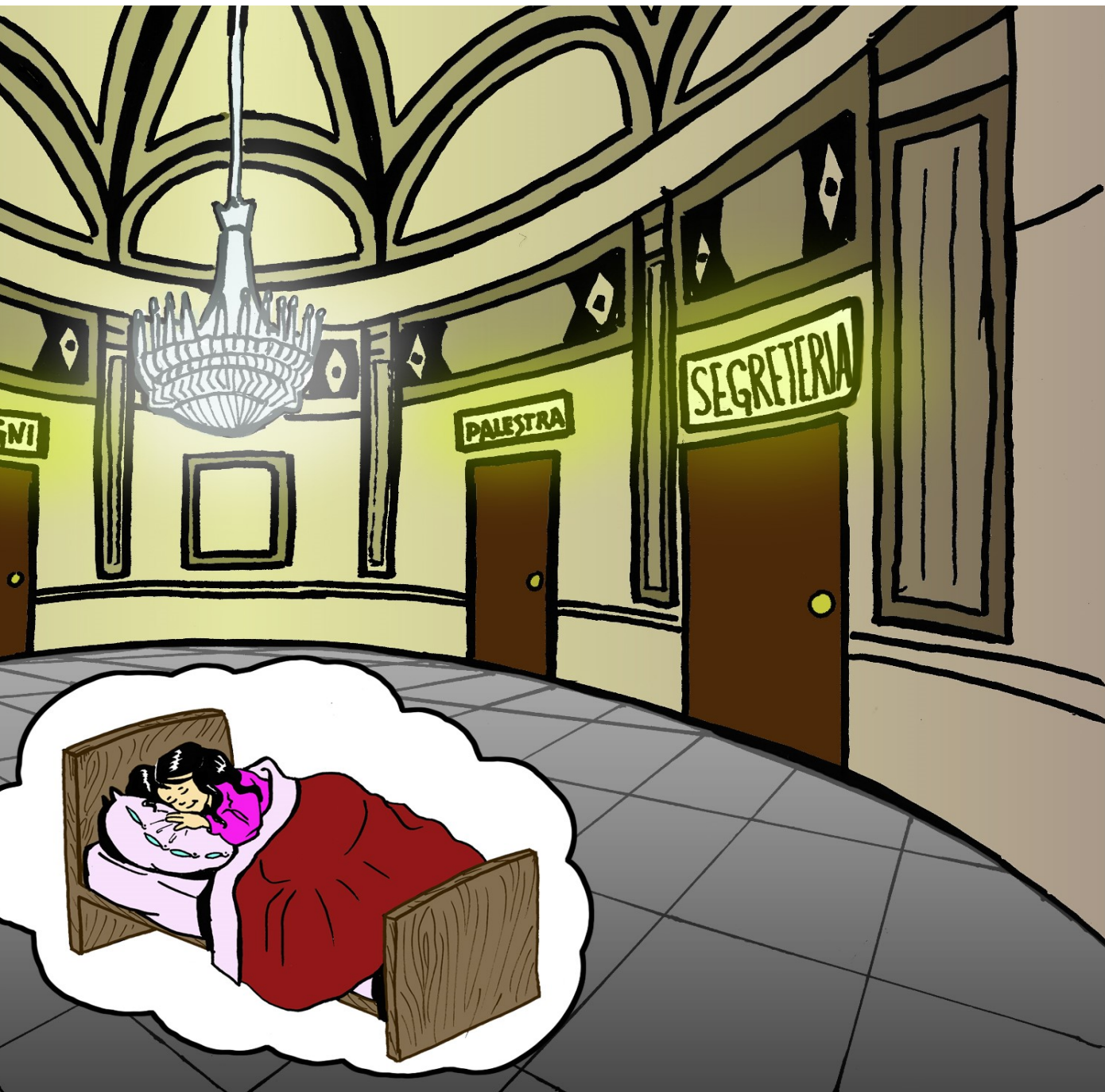
ORBIALE ATOMICO

che è la regione di spazio intorno al nucleo in cui la probabilità di trovare l'elettrone è molto alta.

Il luogo in cui è più facile incontrare la studentessa Alice della 3b, in una mattina di un giorno feriale di maggio è la scuola. Allora l'orbitale atomico di Alice è l'edificio scolastico. Non siamo però sicuri di incontrarla perché può subentrare un fatto eccezionale quale una malattia o un im-



Dove potrebbe essere Alice, la studentessa della 3b, un lunedì di Marzo? M

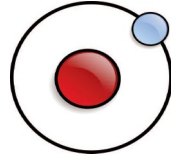


Molto probabilmente a scuola, quindi l'orbitale atomico di Alice è la scuola: la segreteria, la palestra, il bagno o la sua classe. Ma Alice potrebbe anche essere malata o in viaggio con i genitori!

pegno familiare o altro. Vi è un'alta probabilità di trovarla a scuola, ma non vi è la certezza!



IL PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE E IL PROBLEMA DELLA MISURA



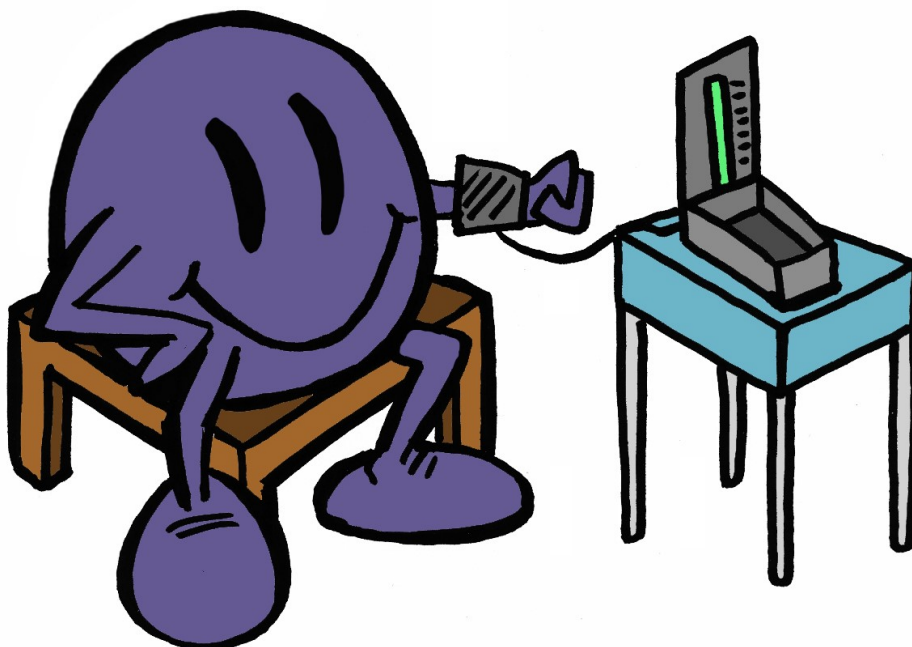
Il principio di sovrapposizione, formulato dal fisico austriaco Erwin Schrödinger, è riuscito a spiegarmi tantissimi fenomeni che, quando parlavo con gli amici incontrati nel mondo dei quanti, mi sembravano completamente illogici.



Questo principio è uno degli aspetti fondamentali della teoria quantistica e lo scienziato che me lo ha illustrato, lo ha legato al **problema della misurazione**, che qui sembra avere un ruolo fondamentale.

Cercherò di ricordare tutti i passaggi e di spiegarlo esattamente come è stato spiegato a me... mi auguro di non fare pasticci!

Ogni cosa che ci circonda ha delle proprietà, ad esempio la grandezza, il colore, il peso e molte altre ancora. Anche una persona ha delle proprietà, come il colore o la lunghezza dei capelli, il colore degli occhi, l'altezza o il peso. Noi, semplicemente guardando quella persona, possiamo stabilire se abbia gli occhi verdi o neri, o se abbia i capelli lunghi e biondi o corti e castani. Quella persona avrà inoltre un peso e un'altezza ben precisi, che possiamo tranquillamente misurare con gli strumenti adeguati. Anche le particelle studiate in fisica quantistica hanno delle proprietà, che possono assumere una serie di valori.

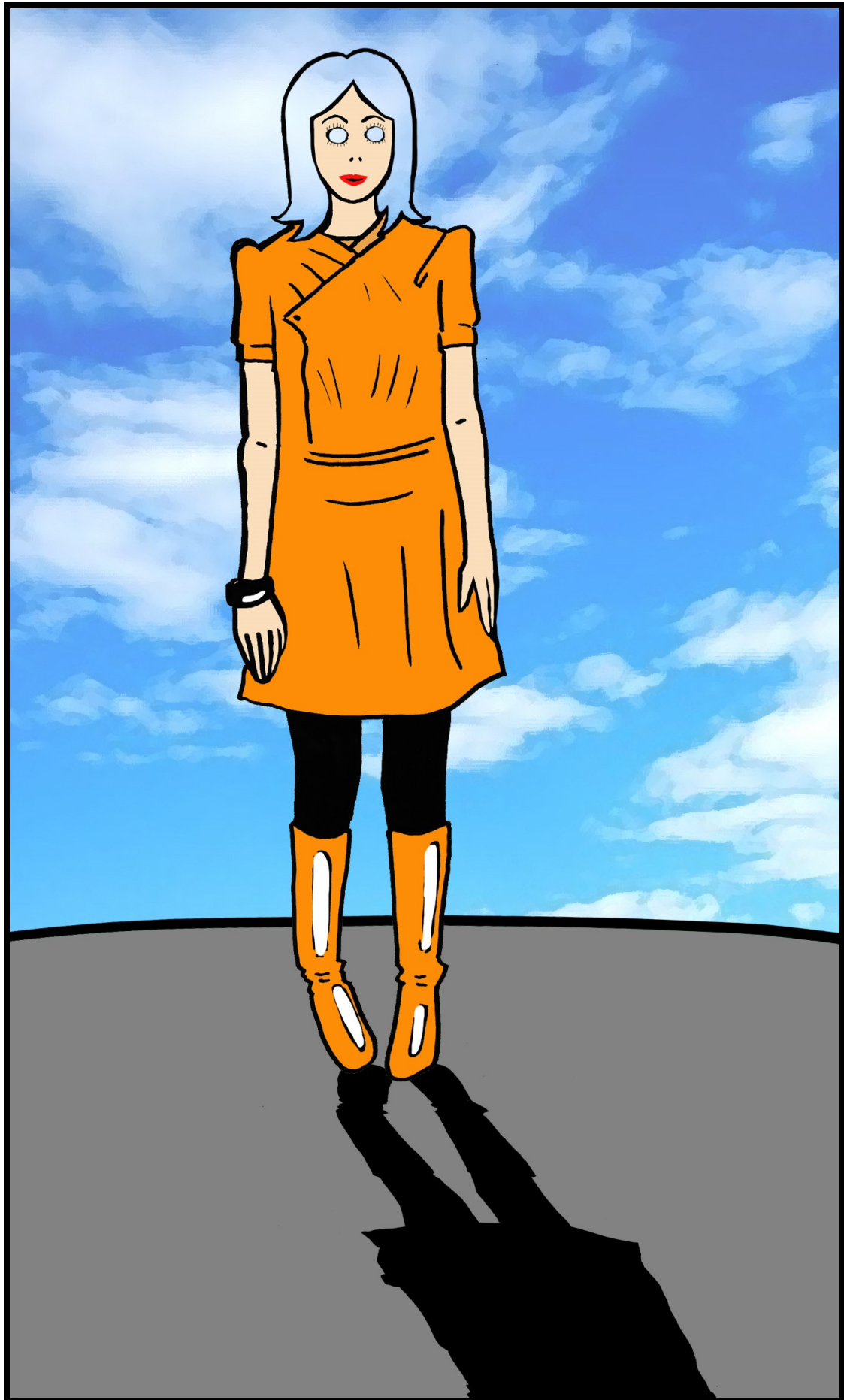


Secondo la fisica quantistica, una particella, finché non viene misurata, non ha delle proprietà ben determinate...ma ha tutte le proprietà che potenzialmente può avere!

La cosa sorprendente che avviene però è che finché non si esegue una misurazione, la particella si trova in uno stato "indefinito", cioè costituito dalla "sovrapposizione" di tutti i suoi possibili stati. In parole povere, prima del processo di misurazione, la particella si trova contemporaneamente in tutti gli stati in cui può "potenzialmente" trovarsi e diverrà una cosa determinata soltanto come conseguenza di un atto di misurazione. Proprio come raccontavo prima: è come se finché siamo chiusi nella nostra cameretta e nessuno ci disturba, facciamo tutte ciò che potremmo fare contemporaneamente, e solo dopo che qualcuno entra nella stanza, e ci "misura", vede che stiamo facendo solo una cosa. I fisici, che si esprimono con paroloni quasi sempre incomprensibili, dicono che lo stato del sistema, all'atto della misurazione di una sua osservabile, "collassa" in uno tra i possibili autostati definiti per quella osservabile.

Paroloni a parte, ricordo chiaramente di essere rimasta a bocca aperta! Perché, se ho capito bene, è come se la mia amica Wendy non avesse nessun colore dei capelli e nessun colore degli occhi, e nessuna altezza, e nessun peso, o per essere più precisa è come se avesse tutti i colori possibili dei capelli, tutti i possibili colori degli occhi etc. finché io, con i miei strumenti (anche i miei occhi sono degli strumenti!), non decidessi di misurarla!

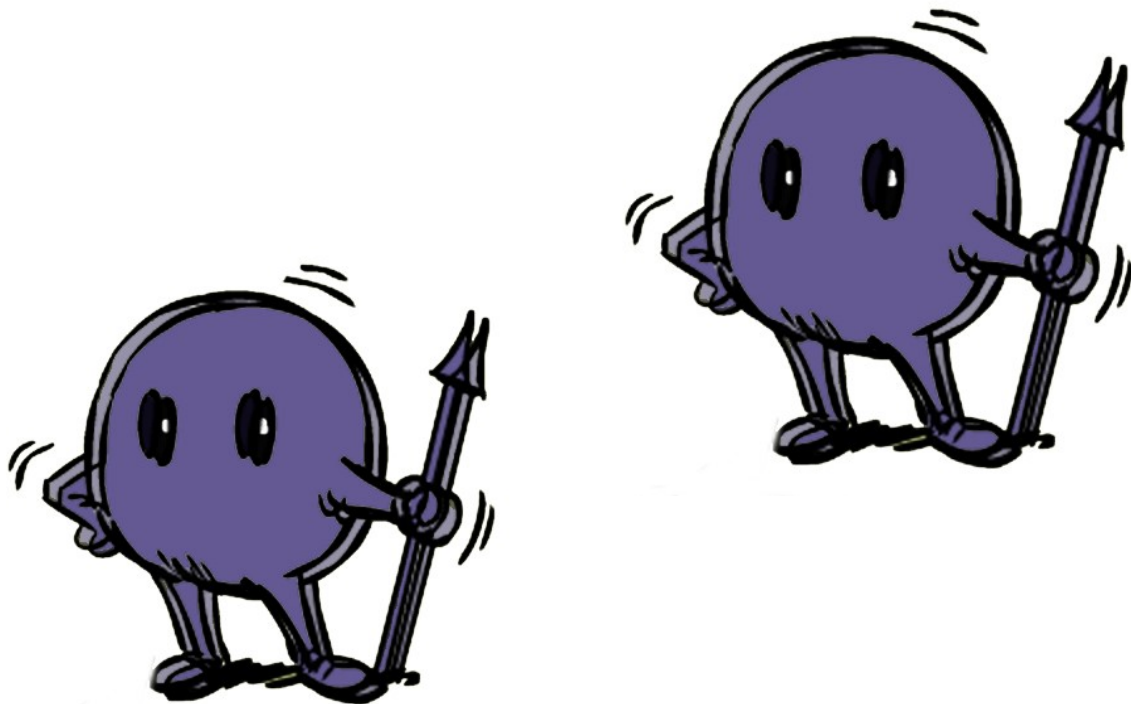




Il fisico con cui discutevo mi ha tranquillizzata, dicendo che anche un altro famosissimo scienziato, Albert Einstein, ha sollevato le mie stesse obiezioni, anche lui era fermamente convinto che una particella dovesse avere delle proprietà a prescindere dal fatto che qualcuno le misuri ma, con sommo stupore di entrambi, avrei scoperto in seguito che non avrei dovuto stupirmi!

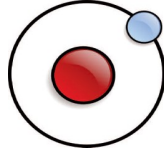
Albert Einstein era convinto che le proprietà delle particelle esistessero anche prima della misurazione, fossero "oggettive", cioè prescindessero dall'osservatore, dalla misura e da qualsiasi altra cosa - per dirla con le sue parole: "Se un albero cade produce rumore anche se non c'è nessuno ad ascoltarlo!"

Per questo motivo considerava la teoria quantistica incompleta e propose una teoria che prevedeva delle "variabili nascoste" che, una volta scoperte, secondo lui, avrebbero reso completa l'intera teoria.



Se anche nel nostro mondo fossero evidenti le leggi della fisica quantistica, non avremmo nessuna proprietà determinata (o meglio, tutte le proprietà che potenzialmente potremmo avere) finché qualcuno non ci "misura" osservandoci!

EFFETTO TUNNEL



Il principio di sovrapposizione è riuscito a spiegarmi anche come ha fatto il coniglio a passare attraverso il portone (senza spaccarsi la testolina!).

Il fenomeno che ha usato viene chiamato "effetto tunnel" e si verifica quando una particella urta una barriera di potenziale. Per capire cercare di capire questo processo possiamo immaginare una piscina vuota all'interno della quale c'è una palla che rimbalza senza avere, però, la possibilità di uscire.

Le pareti della piscina, alte ad esempio 2 metri, rappresentano la barriera di potenziale mentre la palla, i cui rimbalzi non superano ad esempio 1 metro di altezza, rappresenta l'elettrone in movimento.



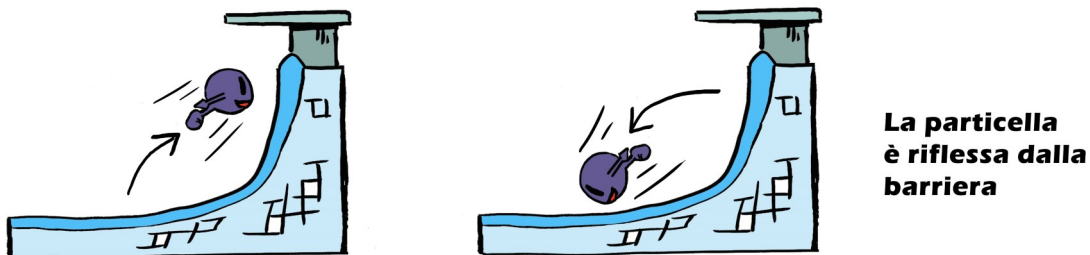
Secondo la fisica classica, la palla non potrà mai superare il dislivello di 2m e quindi non uscirà mai dalla piscina, non potendo andare oltre 1m di altezza.

Dal punto di vista quantistico, invece, le cose vanno assai diversamente.

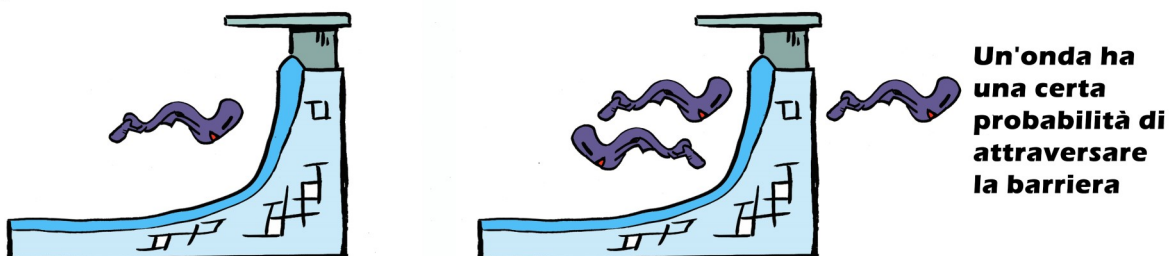
Scegliendo opportunamente l'altezza e l'ampiezza della piscina è possibile creare una situazione per cui la palla, in questo caso un elettrone, abbia le stesse probabilità di superarla o di rimanere all'interno.

Ah...per rendere le cose ancora più misteriose... vi ricordo che, secondo il principio di indeterminazione, è impossibile osservare l'elettrone durante l'attraversamento della barriera ma soltanto prima e dopo il passaggio.

FISICA CLASSICA



FISICA QUANTISTICA



Il principio di sovrapposizione degli stati fu oggetto di un famosissimo "Gedanken Experiment" - locuzione tedesca che significa "esperimento mentale" - ideato dallo stesso Erwin Schrödinger e denominato "il paradosso del gatto". Schrödinger infatti, sebbene avesse lui stesso formulato questo principio, non riusciva ad accettare le conseguenze che implicava, e, insieme ad Einstein, era fermamente convinto che nella fisica quantistica ci fosse qualcosa che non andava, e che bisognava capire meglio. Anche per lui era inaccettabile il fatto che l'osservatore e il processo di misura avessero un ruolo così fondamentale, tanto che fosse proprio la misura a stabilire effettivamente le proprietà di una particella. Vediamo cosa ideò il fisico austriaco.

Immaginiamo di chiudere, per un certo tempo, un gatto in una scatola di acciaio insieme ad un dispositivo che, se azionato da un evento casuale (cioè qualcosa forse accade o forse non accade) come un decadimento radioattivo, (l'emissione casuale di una particella) aziona l'interruttore di un martelletto che, a sua volta, rompe una fiala di veleno.



Attenzione! Le leggi della fisica quantistica non sono valide solo per gli oggetti minuscoli...sono leggi universali, valide anche per noi, solo che nel nostro mondo non sono percepibili.

Se anche nel nostro mondo fossero evidenti, un gatto chiuso in una scatola (quindi senza esser disturbato o misurato) con un marchingegno che può o non può azionare un martelletto che rompe una fiala di veleno, dopo un po' di tempo sarebbe o vivo (se il martelletto non ha rotto la fiala) o morto (se invece lo ha fatto)! Il gatto sarebbe quindi in una sovrapposizione di stati: vivo e morto, e ci rimarrebbe finché qualcuno non aprirebbe la scatola!

Dato che l'atomo, in quell'intervallo di tempo, esiste in due stati sovrapposti - è sia decaduto che non decaduto - il gatto è sia vivo che morto fino a che non si apre la scatola, compiendo un'osservazione.

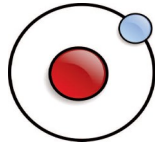
Quindi la domanda è: Il gatto sarà vivo o morto in quest'istante, o tra dieci minuti, o tra un'ora? Per la meccanica quantistica è soltanto quando l'osservatore compie la sua 'misura' aprendo la scatola che l'evento si presenta in uno dei due stati possibili (gatto vivo, gatto morto). Finché nessuno apre la scatola, il gatto è sia vivo sia morto!

Il paradosso dello sfortunato animale, vuole sottolineare il significato molto speciale che acquista la misura in questa teoria.

Il paradosso del gatto di Schrödinger è un aspetto, molto noto, di fenomeno di "entanglement", ma questo è un altro capitolo!

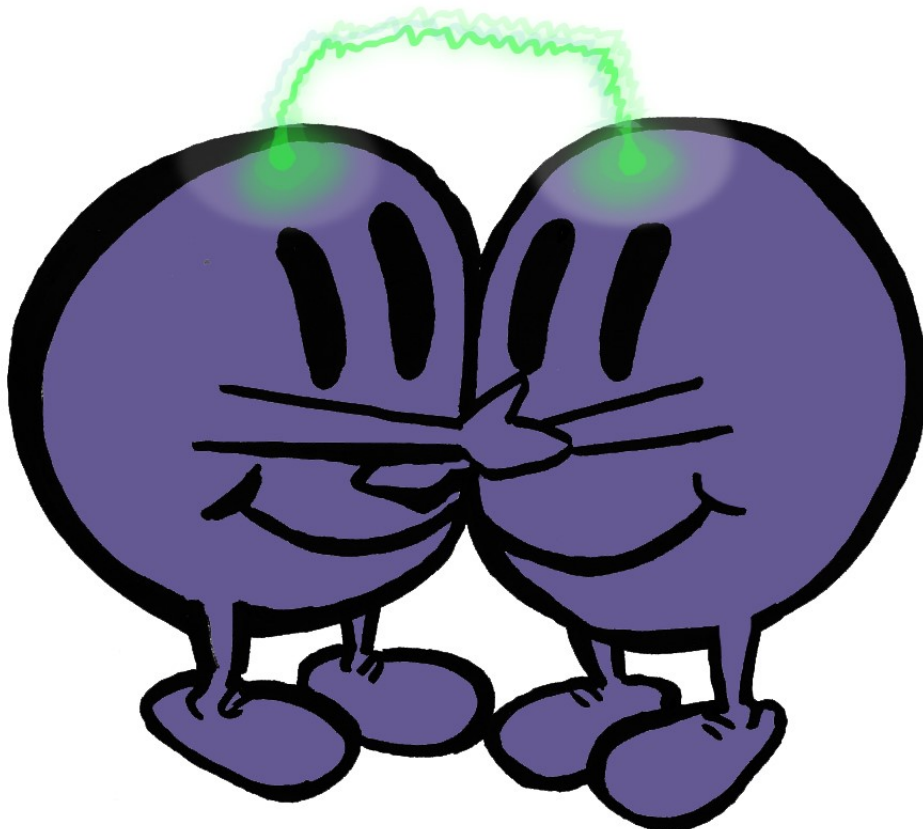


ENTANGLEMENT

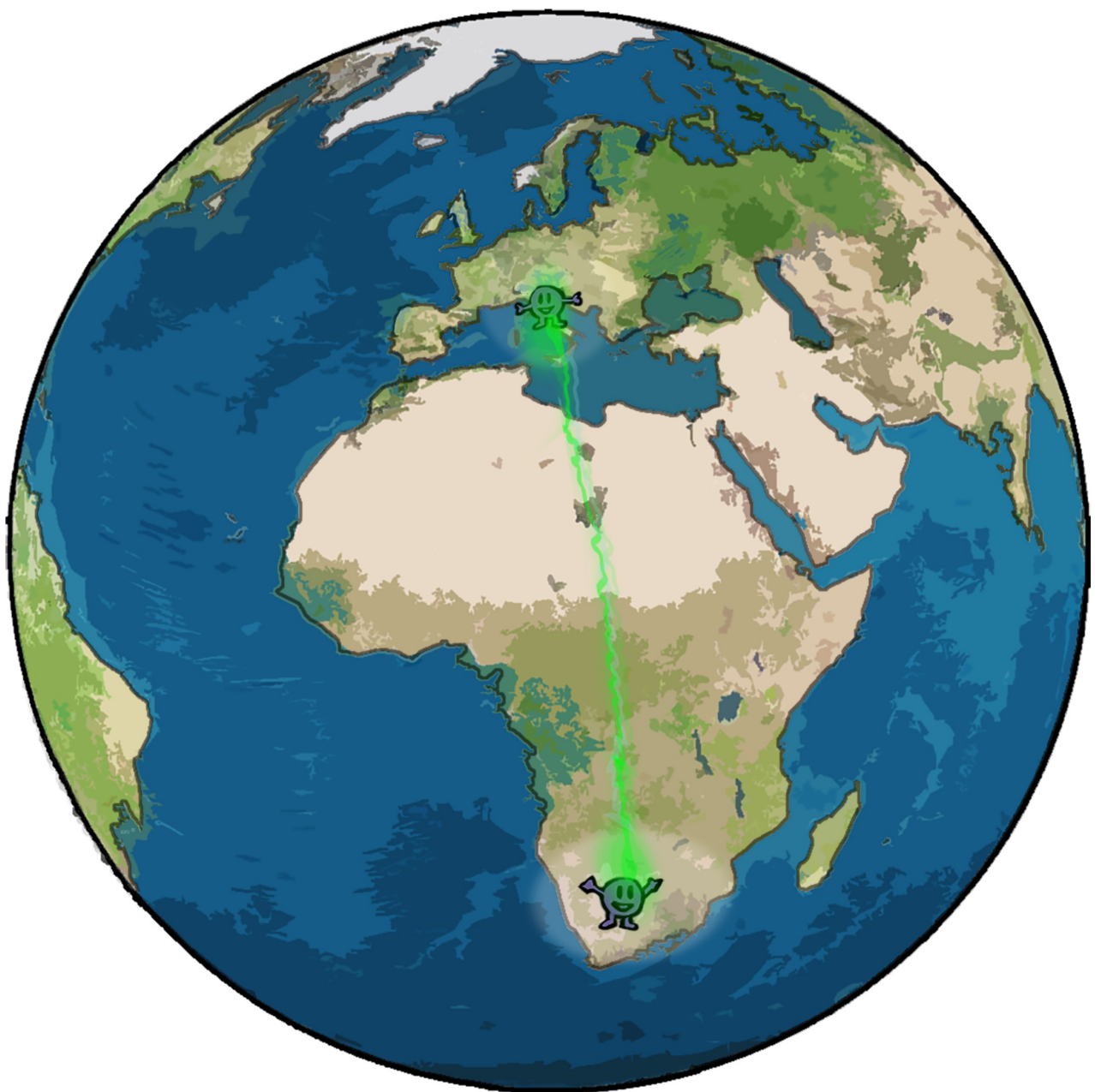


Strana parola, vero? Si tratta di una parola inglese che descrive una situazione molto "romantica" che si può creare tra due particelle. Vi è mai capitato di sentire un legame particolare col vostro migliore amico, con un fratello o una sorella o con i genitori? Un filo invisibile che vi lega a loro e vi fa avvertire se c'è qualcosa che non va' anche se non siete fisicamente vicini? A me qualcosa del genere è capitato di sentirla nei racconti di due miei cugini gemelli.

In fisica quantistica esiste una cosa molto simile a questa, ma non è una sensazione, è una **proprietà** che alcune particelle possono avere. Questa proprietà viene chiamata "intreccio", "groviglio", "correlazione", in inglese *entanglement*.



Se due particelle stanno vicine per un certo tempo, possono diventare *entangled*. È come se le due particelle, nel momento della loro interazione, fossero diventate un tutt'uno, si fossero scambiate ogni possibile informazione che potessero scambiarsi e fossero diventate totalmente dipendenti l'una dall'altra. Quando verranno separate, qualsiasi cosa accada ad una delle due, cioè qualunque misura decidiamo di effettuare su una particella, l'altra verrà a saperlo **istantaneamente**, anche se le due particelle saranno lontanissime tra loro, e istantaneamente si comporterà di conseguenza. È come se l'entanglement stabilisse una serie di regole che le particelle non potranno fare a meno di rispettare.



Ricordate cosa stabilisce il principio di sovrapposizione? Finché una particella non viene misurata si trova in una sovrapposizione di tutti gli stati in cui potenzialmente può trovarsi. Bene, se abbiamo due particelle *entangled* che nessuno ha misurato e l'*entanglement* che c'è tra loro ha stabilito che le due particelle dovranno avere i capelli chiari e i capelli scuri, accadrà che appena qualcuno misurerà una particella, trovando i capelli chiari, la seconda avrà istantaneamente i capelli scuri.

Beh, sembra carino, vero?

Ma, quando gli scienziati scoprirono questa simpatica proprietà, non fecero propriamente i salti di gioia...e sapete perché? Per quella parola, quell'unica parolina che avete appena letto in grassetto: istantaneamente.

Che cosa vuol dire che un evento accade nello stesso istante di un altro? Due eventi accadono istantaneamente se tra l'uno e l'altro non è trascorsa neanche una minuscola unità di tempo. Quindi se io nel mio laboratorio ho una particella e decido di fare una misura, l'altra particella, che si trova, per esempio, in Giappone, verrà a saperlo istantaneamente. Il fatto che arrovellava la mente degli scienziati più brillanti è che se le particelle che si comportano in questo modo violano il **principio di località**! Un principio molto intuitivo, secondo il quale



Ciò che accade in un luogo non può influire immediatamente su ciò che accade in un altro



Due particelle entangled, molto lontane tra loro, dovrebbero comunicare a velocità infinita.

Ed ecco che a questo punto entra in gioco il concetto di velocità: le parole "istantaneamente" o "immediatamente" infatti fanno subito pensare a qualcosa di super veloce:

Ed ecco il problema: Vi siete mai chiesti se esiste e qual è la velocità massima a cui qualcosa può viaggiare?

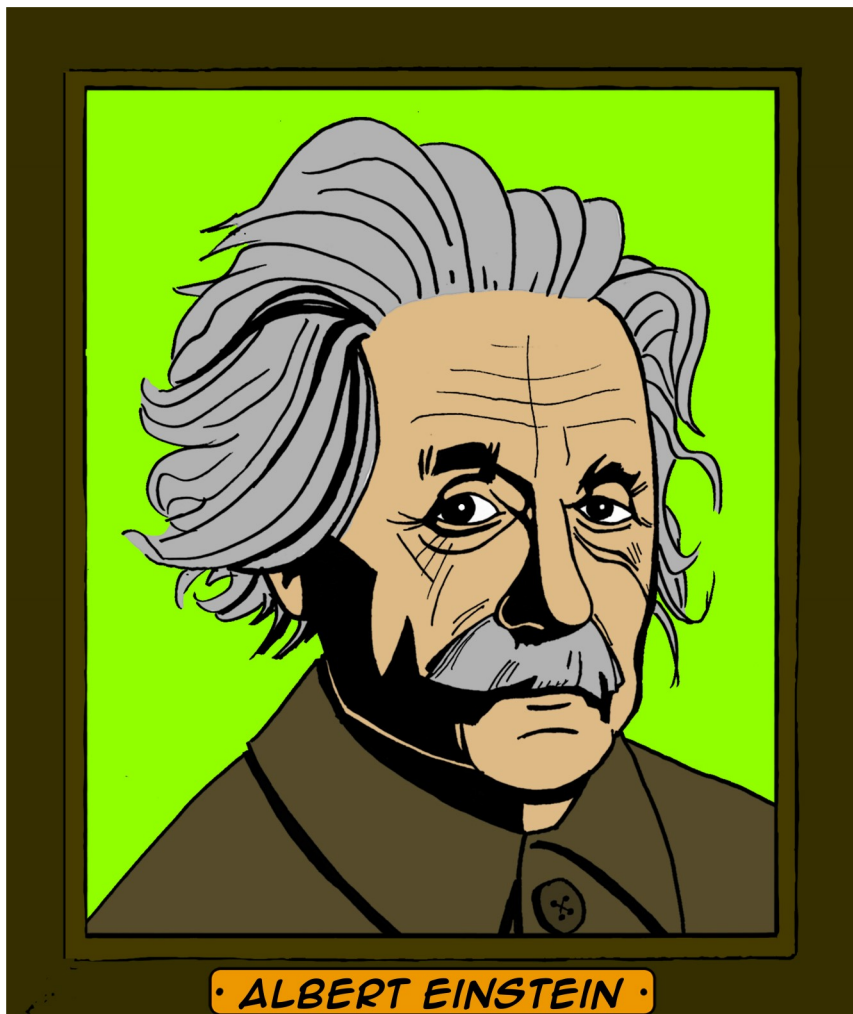
Ecco le risposte:

1. Esiste una velocità massima
2. E' la velocità della luce!

La velocità della luce è la più veloce esistente nell'universo, la luce percorre 300.000 chilometri al secondo, quindi talmente tanto spazio in così poco tempo che nella nostra esperienza non riusciamo neanche a renderci conto talmente è breve. Se, per esempio, accendiamo la lampadina della nostra stanza sembra che si accenda nello stesso istante in cui premiamo l'interruttore eppure non è così! La luce, per arrivare ai nostri occhi, impiega un certo tempo, anche se piccolissimo. Possiamo farcene un'idea se pensiamo ad oggetti molto lontani da noi: la luce emessa dal Sole, ad esempio, impiega 8 minuti per arrivare fino ai nostri occhi, la luce della galassia a noi più vicina, la galassia di Andromeda, impiega circa 2 milioni di anni per arrivare sulla Terra!

L'informazione quindi non può viaggiare più veloce della luce!
Due particelle *entangled* sembrano comunicare tra loro a velocità infinita, mentre la fisica insegna che non esistono azioni a distanza, ovvero azioni che si propagano a velocità superiore a quella della luce.

Albert Einstein, era uno di quegli scienziati che non riusciva ad accettare questo strano fenomeno dell'*entanglement* e ciò che esso comportava, ovvero "questa maledetta azione fantasma a distanza" per usare le sue parole. Cominciò a pensare quindi che la violazione del principio di località fosse solo apparente, e nel 1935 insieme a Podolsky e Rosen, pubblicò un articolo famosissimo e ricordato col nome di "Paradosso E. P. R.", dalle iniziali degli scienziati che l'hanno scritto. Lo scopo dell'articolo era dimostrare che se la teoria della fisica quantistica ammette un fenomeno tanto irrealista come l'*entanglement*, allora non è completa, bisognava aggiungere dei pezzettini alla teoria per riuscire a spiegare tutti i fenomeni possibili.



Da dove partono i tre scienziati per dimostrare la loro tesi?
Semplice, come ogni teoria che si rispetti, si parte da alcuni presupposti, cioè principi considerati veri e che quindi non hanno bisogno di essere dimostrati.

Il primo principio lo abbiamo già incontrato, è il principio di località.
A questo principio se ne aggiungo altri due:



Principio di completezza

Se la meccanica quantistica è una teoria fisica completa, allora deve spiegare tutti i fenomeni per i quali è valida.

In altre parole se le proprietà "avere i capelli chiari" e "avere i capelli scuri" risulteranno proprietà oggettive di Sara e Susanna allora queste proprietà devono poter essere spiegate dalla teoria.



Principio di realtà

Tutti gli oggetti devono oggettivamente possedere dei valori preesistenti per ogni possibile misurazione prima che queste misurazioni vengano effettuate.



Per riprendere l'esempio che lo stesso Einstein mi ha illustrato mentre ero nel mondo dei quanti potremmo riformulare il principio di realtà in questo modo:

"Se, senza disturbare Susanna in alcun modo (infatti l'osservatore verifica il colore dei capelli di Sara mentre Susanna si trova in un altro posto) riusciamo a predire il colore dei suoi capelli (chiaro) allora Susanna avrà realmente i capelli chiari".

Susanna non è stata disturbata dall'osservazione fatta su Sara; infatti, come afferma il principio di località, "non sono ammesse azioni a distanza, cioè influenze che si trasmettono a velocità superiore a quella della luce"



SARA E SUSANNA SONO DUE BAMBINE CHE SONO STATE ACCANTO PER UN CERTO TEMPO, HANNO INTERAGITO TRA LORO DIVENTANDO ENTANGLED, QUINDI UNA COSA SOLA, LEGATE PER TUTTA LA VITA. AD UN CERTO PUNTO, SARA E SUSANNA VENGONO SEPARATE. NON POSSONO VEDERSI E COMUNICARE TRA LORO.

NOI VOGLIAMO MISURARE DUE GRANDEZZE DI SARA E SUSANNA: IL COLORE DEI CAPELLI E IL COLORE DEGLI OCCHI, CHE SONO DUE GRANDEZZE INCOMPATIBILI PER IL PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE, PROPRIO COME LA VELOCITÀ E LA POSIZIONE.



IN VIRTÙ DELL'ENTANGLEMENT CHE SI È CREATO ACCADRÀ CHE



SARA AVRÀ I CAPELLI SCURI SOLO SE SUSANNA AVRÀ I CAPELLI CHIARI E SARA AVRÀ I CAPELLI CHIARI SOLO SE SUSANNA AVRÀ I CAPELLI SCURI.



LO STESSO VALE PER IL COLORE DEI CAPELLI: SARA AVRÀ GLI OCCHI SCURI SOLO SE SUSANNA AVRÀ GLI OCCHI CHIARI E VICEVERSA.



AL MOMENTO SARA E SUSANNA NON SONO STATE MISURATE QUINDI SI TROVANO IN UNA SOVRAPPONIZIONE DI STATI, NESSUNO CONOSCE IL COLORE DEI CAPELLI E DEGLI OCCHI DI SARA E SUSANNA. SUPPONIAMO CHE AD UN CERTO PUNTO UN OSSERVATORE, BOB, DECIDA DI MISURARE IL COLORE DEI CAPELLI DI SARA SCOPRENDO CHE, SARA HA I CAPELLI SCURI. DI CONSEGUENZA SAPRÀ ANCHE CHE SUSANNA HA I CAPELLI CHIARI.



... NEL FRATTEMPO, L'OSSERVATORE CHE SI TROVA CON SUSANNA NON HA ESEGUITO ALCUNA MISURA QUINDI NON SA ASSOLUTAMENTE NIENTE SUL COLORE DEI SUOI CAPELLI...

A QUESTO PUNTO SORGE IL PROBLEMA:
QUALI SONO LE PROPRIETA' OGGETTIVE DI SUSANNA?
QUELLE CONOSCIUTE DA BRIAN O DA BOB?



SE UNIAMO IL PRINCIPIO DI REALTÀ E IL PRINCIPIO DI LOCALITÀ LA RISPOSTA PUÒ ESSERE UNA SOLA: SUSANNA HA I CAPELLI CHIARI! INFATTI LA MISURA CHE È STATA FATTA A SARA NON PUÒ AVER DISTURBATO SUSANNA, CHE SI TROVA MOLTO LONTANO E INOLTRE NON SONO AMMESSE "AZIONI A DISTANZA" CHE SI TRASMETTANO A VELOCITÀ SUPERIORI A QUELLA DELLA LUCE.

L'OSSERVATORE PERÒ AVREBBE POTUTO SCEGLIERE DI MISURARE IL COLORE DEGLI OCCHI INVECE DI DEL COLORE DEI CAPELLI QUINDI GLI OCCHI SCURI OPPURE GLI OCCHI CHIARI SAREBBE STATA UNA PROPRIETÀ OGGETTIVA DI SUSANNA

DEVE ALLORA VERIFICARSI UNO DEI 2 SEGUENTI CASI:

1) I CAPELLI CHIARI E GLI OCCHI SCURI È UNA PROPRIETÀ OGGETTIVA DI SUSANNA AL TEMPO T_2



2) I CAPELLI CHIARI E GLI OCCHI CHIARI È UNA PROPRIETÀ OGGETTIVA DI SUSANNA AL TEMPO T_2 .



SECONDO L'IPOTESI DI COMPLETEZZA FISICA: SE LE PROPRIETÀ "AVERE I CAPELLI CHIARI" E "AVERE I CAPELLI SCURI" RISULTERANNO PROPRIETÀ OGGETTIVE DI SUSANNA ALLORA QUESTE PROPRIETÀ DEVONO POTER ESSERE SPIEGATE DALLA TEORIA. MA QUESTO NON È POSSIBILE PERCHÉ CONTRADDICE IL PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE! IL COLORE DEI CAPELLI E IL COLORE DEGLI OCCHI SONO DUE GRANDEZZE INCOMPATIBILI!

QUINDI SECONDO EINSTEIN AVEVAMO SBAGLIATO A PARTIRE DAL PRESUPPOSTO CHE LA TEORIA DELLA FISICA QUANTISTICA FOSSE COMPLETA

L'unione del principio di località e del principio di realtà, ritenuti da Einstein universalmente veri, – in aggiunta all'ipotesi di completezza – ammette una sola conclusione: l'incompletezza della meccanica quantistica; infatti, dicono gli autori, essendo gli ultimi due principi fisicamente innegabili, concludono che l'errore sta nell'assumere la validità del principio di completezza fisica. Affermare che il principio di completezza non è valido vuol dire affermare che la fisica quantistica non è completa, cosicché viene ipotizzata l'esistenza di variabili nascoste che, una volta trovate, avrebbero reso la fisica quantistica una teoria completa.

In realtà, anche il grande Albert Einstein si renderà conto che il paradosso da lui inventato non dimostra che la fisica quantistica sia incompleta, dimostra solo che le tre ipotesi da cui è partito siano incompatibili. Secondo Einstein l'ipotesi colpevole è la completezza fisica, lui sostiene che la teoria è incompleta. Un altro grande fisico di cui abbiamo parlato precedentemente, Niels Bohr, ritiene che il principio di realtà non abbia senso quando si parla di fisica quantistica; secondo Bohr un oggetto diventa reale solo se viene misurato, prima non esiste. Inoltre altri scienziati hanno dimostrato che il colpevole potrebbe essere il principio di località, l'entanglement infatti è definita una proprietà "non locale" .

Proprio in virtù di questo la fantascienza che leggiamo sui libri potrebbe diventare realtà: esiste infatti il teletrasporto quantistico, ma questa è un'altra storia!

CONCLUSIONI

Abbiamo tentato di mostrare come il fumetto e il racconto illustrato possano rappresentare valide alternative per diventare strumenti di divulgazione scientifica, in particolare per la generazione cosiddetta "nativa digitale", che ha accesso giornaliero ai social network, agli smartphone, alle app, tutti ricchi di contenuti multimediali che implicano una propensione verso la lettura veloce e le immagini. Attraverso la scelta di adeguate strategie didattiche, facendo soprattutto uso di situazioni metaforiche, similitudini e analogie, si può far partire il procedimento mentale che porta dal noto all'ignoto, permettendo di acquisire nuove conoscenze partendo da quelle che già si possiedono.

Scrive Giuseppe Pellegrini: «In definitiva, la scelta di una facoltà scientifica è una questione complessa, che matura nel tempo e affonda le radici motivazionali nelle esperienze scolastiche precedenti. Un ambiente scolastico appassionante, dotato di strutture adeguate e docenti motivati, appare il luogo migliore per stimolare a intraprendere studi scientifici. Ma anche l'editoria appare in grado, a certe condizioni, di offrire importanti stimoli agli studenti, presentando in modo accattivante discipline tradizionalmente percepite come ostiche ed elitarie.»¹

¹ G. Pellegrini (2011)

Nel corso della stesura della parte sperimentale del presente elaborato, sono state incontrate alcune difficoltà, dovute soprattutto alla scelta del linguaggio più appropriato da usare, quindi alla necessità di illustrare fenomeni e principi della fisica quantistica facendo ricorso alla sola lingua italiana, senza poter contare sulle preconcoscenze dell'argomento degli adolescenti.

La parte più stimolante – ed anche quella che si ritiene essere la più riuscita – è stata quella di inventare situazioni metaforiche per illustrare argomenti altrimenti incomprensibili per il target di riferimento. Le figure retoriche usate, lungi dall'essere dettagliate e rigorose da un punto di vista matematico, hanno però giocato bene il ruolo per cui sono state create: dare l'idea qualitativa del fenomeno senza la pretesa di spiegarlo esaustivamente. La creazione di situazioni metaforiche unita alla loro rappresentazione visiva, sembra essere il giusto connubio per tentare un approccio verso la fisica quantistica per un pubblico di adolescenti.

In questo senso decisiva è stata, e sarà, la prova sperimentale. Infatti – sebbene sia stato già sperimentato in maniera informale – il presente prodotto editoriale è stato presentato come progetto per le scuole secondarie di primo grado all'interno di un progetto strutturato e più ampio di divulgazione.

BIBLIOGRAFIA

- ❖ A. D. Aczel, "Entanglement, il più grande mistero della fisica", Raffaello Cortina Editore, Milano, 2001.
- ❖ AA. VV. "I nativi digitali in Calabria. Sintesi dei risultati", Fondazione Censis, Roma, 2001.
- ❖ G. Auletta, "Foundations and Interpretations of Quantum Mechanics", World Scientific, Singapore, 2001.
- ❖ P. Baranger, B. Schiele, "Science Communication Today. International Perspectives, Issues and Strategies", CNRS éditions, Paris, 2013.
- ❖ R. Baracca, R. Livi, S. Ruffo, "Le tappe dello sviluppo della teoria dei quanti nel quadro della seconda rivoluzione industriale e della contraddizioni del capitalismo del primo dopoguerra", Quaderni di Scienze, Storia e Società, Clup-Clued, Milano, 1979.
- ❖ N. Barbieri, "Insegnare pedagogia e scienze dell'educazione della scuola dell'Autonomia", Cleup, Padova, 2004.
- ❖ J. S. Bell, "Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics: Collected Papers on Quantum Philosophy", ed. riv. Cambridge University Press, 2004, (ed. or. 1987).
- ❖ I. Benzoni (a cura di), "L'incontro... una storia, tante storie. Lo sfondo integratore non è un filo conduttore", Edizioni Junior, Azzano San Paolo, 2000.
- ❖ N. Bohr, "Can quantum Mechanic Description of Reality Be Considered Complete?", Phys. Rev. 48, pp. 696-702, 1935.
- ❖ J. Bruner, "Making stories: law, literature, life", Cambridge, MA: Harvard University Press, 2003.
- ❖ Busetti E., Dettori G., Forcheri P., Ierardi M.G., "Promoting teachers collaborative reuse of educational materials, innovative approaches for

- learning and knowledge sharing", Nejd W., Tochtermann K. (eds.) Lecture Notes in Computer Science 4227, pp. 61-73, SpringerVerlag, 2006.
- ❖ Carrada G., "Comunicare la scienza. Kit di sopravvivenza per ricercatori", 2005. Consultato il giorno 02 gennaio 2014 al seguente indirizzo:
<http://www.mestierediscrivere.com/uploads/files/comunicarelascienza.pdf>
 - ❖ Dettori G., "Towards a classification of Narrative Learning Environments", ITD-CNR Report 05/07, Genova, 2007. Consultato il 21/01/2014 al seguente indirizzo:
<http://telearn.noe-kaleidoscope.org/openarchive/browse?resource=1542>
 - ❖ Dettori G., Giannetti T., "Ambienti narrativi per l'apprendimento", TD Tecnologie Didattiche 37, pp. 20-27, 2006.
 - ❖ Dettori G. Morselli F., "Creare contesti di apprendimento mediante un'attività Narrativa", TD Tecnologie Didattiche 42, pp.25-31, 2007.
 - ❖ H, Diels, W. Kranz "I presocratici. Prima traduzione integrale con testi originali a fronte delle testimonianze e dei frammenti", a cura di Giovanni Reale, Bompiani, Milano, 2006.
 - ❖ Dolk M., Den Hertog J., "Teachers' storied lives: narratives in teacher education", Proceedings NILE 2006, P. Brna ed., 2006.
 - ❖ A. Doxiadis, C.H. Papadimistriou, "Logicomix", Guanda, Milano, 2008.
 - ❖ J. Earp, T. Giannetti, "Narrative-oriented software for the learning of a foreign language", in Dettori G., Giannetti T., Paiva A. and Vaz A. (eds.) Technology-Mediated Narrative Environments for Learning, Sense Publishers, Rotterdam-Taipei, 2006.
 - ❖ A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, "Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?" Phys. Rev. 47 777, 1935.
 - ❖ "Almanacco della Scienza", n. 19 del 5/12/2012
Consultato il giorno 5 giugno 2014 su:
http://www.almanacco.cnr.it/reader/cw_usr_view_articolo.html?id_articolo=3977&giornale=3930

- ❖ G.C. Ghirardi, "Un'occhiata alle carte di Dio, gli interrogativi che la scienza moderna pone all'uomo", Il Saggiatore, Milano, 2003.
- ❖ R. Gilmore, "Alice nel paese dei quanti", Raffaello Cortina Editore, Milano, 1996.
- ❖ W. J. González-Espada, "Integrating Physical Science and the Graphics Arts with Scientifically Accurate Comic Strips: Rationale, Description and Implementation". Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias, 2 (1), pp. 58-66, 2003.
- ❖ B. Harbaugh, "How Comics Can Save Us From Scientific Ignorance", 2008 nov. 24. Consultato il giorno 25 Marzo 2014 su:
http://archive.wired.com/culture/education/magazine/16-12/pl_print
- ❖ J. Hosler, K. B. Boomer, "Are Comic Books an Effective Way to Engage Nonmajors in Learning and Appreciate Science?" CBE – Life Sciences Education, 10, 2011. Consultato il giorno 16 febbraio su:
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21885827>
- ❖ S. Hughes, "Comic Book Science in the Classroom", 2005, apr. 08. Consultato il giorno 14 gennaio 2014 su:
www.npr.org/templates/story/story.php?storyId=4581832.
- ❖ A. Karmiloff- Smith, "Oltre la mente modulare. Una prospettiva evolutiva sulla scienza cognitiva", Bologna, Il mulino, 1995.
- ❖ Lave J., Wenger E., "L'apprendimento situato, Dall'osservazione alla partecipazione attiva nei contesti sociali", Erickson, 2006.
- ❖ G. Lippi, "La progettazione per sfondi (progettazione 'istituzionale')", in P. Crispiani, N. Serio (a cura di) Il manifesto della progettazione, Roma, Armando, 1997.
- ❖ T. Maccacaro, "Ricerca, divulgazione e comunicazione della scienza" in "Scienza e Società 9/10", Centro Pristem dell'università Bocconi, Milano, 2012.
- ❖ F. Marano, "Camera etnografica. Storie e teorie di antropologia visuale", Franco Angeli Editore, Milano, 2011.

- ❖ J. J. Meier, "Science graphic novels for academic libraries. Collections and collaborations", *C&RL News*, pp. 662-665, 2012.
- ❖ Novak J.D., "L'apprendimento significativo", Edizioni Centro Studi Erickson, Trento, 2001.
- ❖ P. Odifreddi, "Zichicche: pensieri su uno scienziato a cavallo tra politica e religione", Edizioni Dedalo, 2003.
- ❖ Ortolani L. "LA SCIENZA, ma a fumetti", 2013, ott. 10.
Consultato il giorno 14 Ottobre 2013 su:
leortola.wordpress.com/2013/10/10/la-scienza-ma-a-fumetti/
- ❖ J. Ottaviani, P. Leland, "Un pensiero abbagliante Niels Bohr e la fisica dei quanti", Sironi Editore, Milano, 2007.
- ❖ A. Pais, "Sottile è il signore... La vita e la scienza di Albert Einstein", Boringhieri, Torino, 1986.
- ❖ J. S. Park, D. H. Kim, M. S. Chung, "Anatomy Comic Strips" in *Anatomical Sciences Education* 4, pp. 275-279, 2011.
- ❖ G. Pellegrini, "Che cosa spinge a studiare scienze? Buoni insegnanti, laboratori e fiction", consultato giorno 26/08/2014 su:
<http://www.observa.it/che-cosa-spinge-a-studiare-scienze-buoni-insegnanti-laboratori-e-fiction/?lang=it>
- ❖ Piperno F., "Lo spettacolo cosmico", derive e Approdi, Roma, 2007.
- ❖ M. Prensky, "Digital Natives, Digital Immigrants". *On the Horizon*, 9, 2001.
- ❖ P. Ricoeur, "Hermeneutics and the human sciences", Edited and translated by J.B. Thompson, Cambridge University Press, 2005
- ❖ Rowe J. P., Mcquiggan S. W., Mott B. W., Lester, J. C., "Motivation in Narrative-Centered Learning Environments", *Proceedings of the Workshop on Narrative Learning Environments*, 13th AIED Conference, Marina del Rey, CA, July 2007.

- ❖ Salzberger-Wittenberg, I., Henry-Polacco, G., Osborne, E, "L'esperienza emotiva nei processi di insegnamento e apprendimento", Liguori, Napoli, 1993
- ❖ F. Selleri, "La Fisica del Novecento, per un bilancio critico", Progedit, Bari, 1999.
- ❖ V. Severi, P. Zanelli, "Educazione, complessità e autonomia dei bambini", La Nuova Italia, Scandicci (FI), 1990.
- ❖ Shank R. C., "Tell Me a Story: Narrative and Intelligence", 3^a printing, Northwestern University Press, Evanston, IL., 2000.
- ❖ E. Schrödinger, "The Present Situation in Quantum Mechanics", Proceeding of the Cambridge Philosophical Society, 31, 1935.
- ❖ M. Tatalovic, "Science Comics as Tools for Science Education and Communication: a Brief, Exploratory Study". Journal of Science Communication, 2009.
- ❖ E. Wenger, "Communities of practice, Learning, meaning, and identity", Cambridge University Press, 1998.
- ❖ J. A. Wheeler and H. Zurek, "Quantum Theory and Measurement", University Press, Princeton, 1983.
- ❖ P. Zanelli, "Lo sfondo integratore, uno sfondo per integrare", Bologna, Cappelli, 1986. Consultato giorno 12 Marzo su:
http://www.comune.torino.it/centromultimediale/bambini/pdf/8806_zanelli.pdf
- ❖ A. Zeilinger, "Il velo di Einstein il nuovo mondo della fisica quantistica", Einaudi, Torino, 2005.

SITOGRAFIA

- ❖ <http://en.wikipedia.org/wiki/Wiki>
- ❖ http://www.quantiki.org/wiki/index.php/Main_Page
- ❖ <http://philsci-archive.pitt.edu/>
- ❖ <http://plato.stanford.edu/>
- ❖ <http://www.colorado.edu/physics/2000/index.pl>
- ❖ <http://www.comicom.it>
- ❖ <http://www.edizioni.cnr.it>
- ❖ <http://www.editorialescienza.it>
- ❖ <http://www.ibs.it>