

Chi ha paura del gatto di Schrödinger? Ovvero: i paradossi quantistici e altre storie

Valia Allori

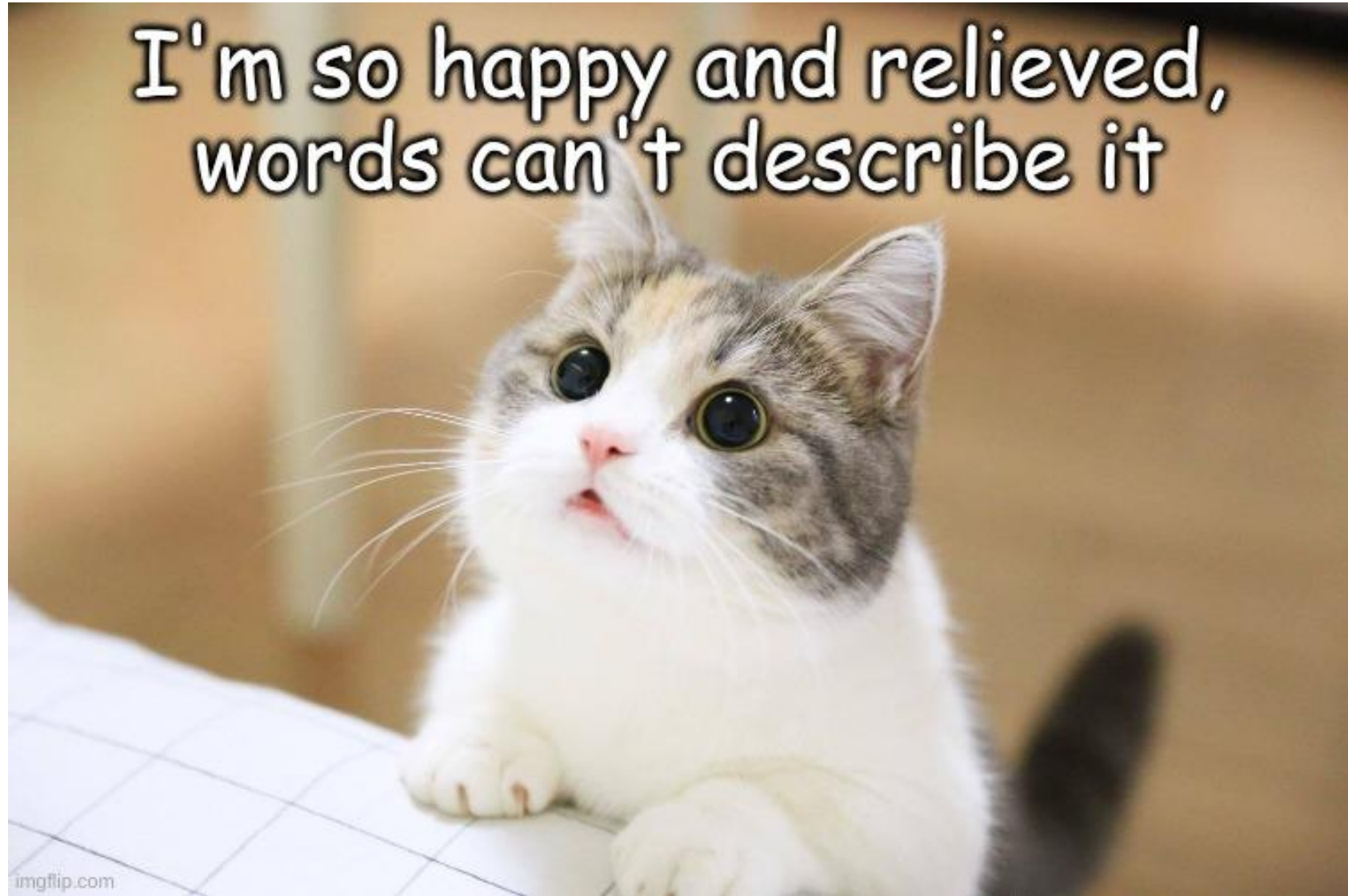
U. di Bergamo

www.valiaallori.com

valiaallori@fastmail.com



Spoiler:
il gatto può
stare
tranquillo...



Schema



- E' difficile dare un senso alla meccanica quantistica
 - **Incompatibile con il realismo scientifico**
- Tipicamente si dice: le teorie quantistiche devono risolvere il problema del gatto di Schrödinger (=il problema della **misura**, PM)
 - Soluzioni: dBB, GRW, MW
- Però....
- I realisti interessati ad una comprensione costruttiva dei fenomeni dovrebbero preoccuparsi invece di un altro problema
 - **Il problema della completezza**: avere un'ontologia spaziotemporale microscopica

Realismo Scientifico

- Le nostre migliori teorie scientifiche ci forniscono delle descrizioni **approssimativamente vere** del mondo
 - Per es., se la teoria parla di virus, allora possiamo concludere che i virus esistano
 - Idem per elettroni, fotoni, ecc.
- Possiamo usare le nostre migliori teorie per guidarci affidabilmente nel fare **metafisica**
- Metafisica (=ontologia): lo studio della **'struttura' fondamentale della realtà**
- Per il realista scientifico (RS) :
 - **Metafisica \leftrightarrow Fisica fondamentale**



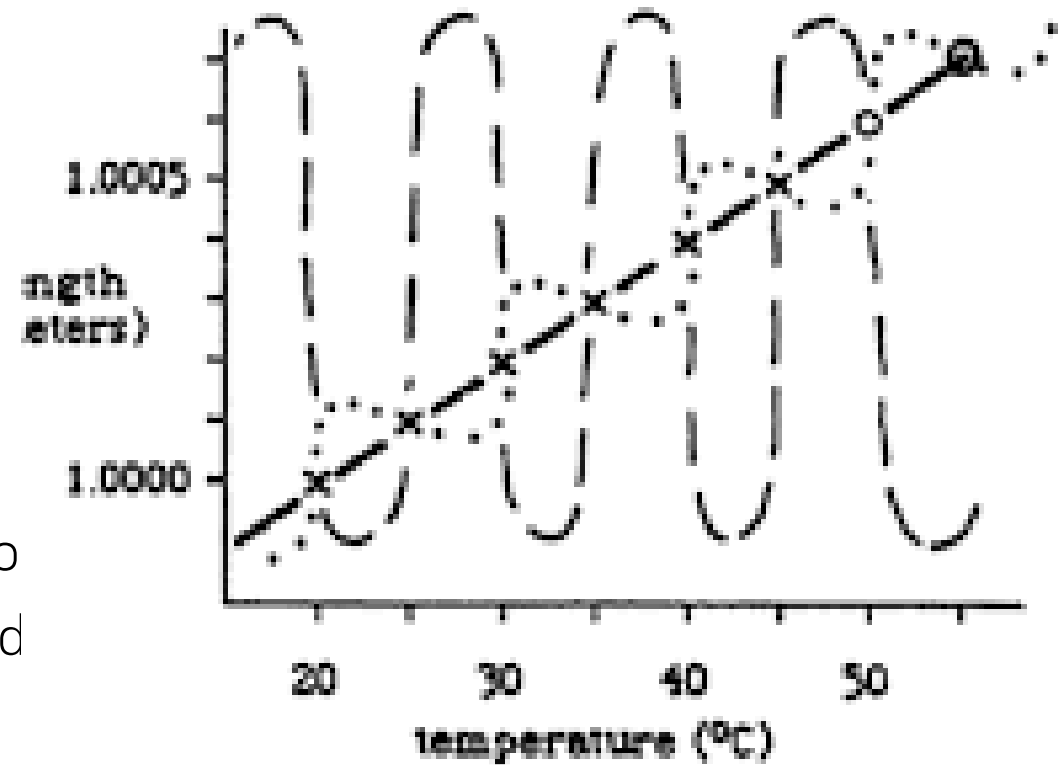
L'argomento del non-miracolo a favore del RS

- Perché si dovrebbe essere realisti?
- Perché il RS è l'unica dottrina che spiega il successo della scienza senza miracoli
- La teoria ha successo (fa predizioni, spiegazioni, unificazioni...) **PERCHE' è vera**
- L'unica alternativa sarebbe che ci fossero dei miracoli:
 - Tutto cospira nel farci pensare che la teoria sia vera, mentre è falsa



Argomenti contro il RS

- **Sottodeterminazione** della teoria dai dati
 - Ci sono infinite teorie empiricamente equivalenti (=compatibili con gli stessi dati sperimentali) mutualmente esclusive (=postulano che esistono cose differenti e incompatibili), quindi non c'è alcun modo per sceglierne una sull'altra
- Risposta del RS: **virtù sovra-empiriche**
 - L'adeguatezza empirica non è l'unica considerazione rilevante
 - Ci sono altre virtù (semplicità, coerenza, potenza esplicativa...) che rendono una teoria più credibile



Argomenti contro il RS

- **Meta-Induzione pessimistica**
- Nel passato, ci sono state teorie di successo che sono poi risultate false
 - Astronomia Tolemaica
 - Teoria del calorico
 - Teoria del Flogisto
 - Meccanica newtoniana
 -
- Quindi, il loro successo non poteva essere dovuto al fatto che erano vere
- Quindi, Il successo di una teoria non è evidenza della sua verità:
- Cioè, l'argomento del **non-miracolo non è fondato**



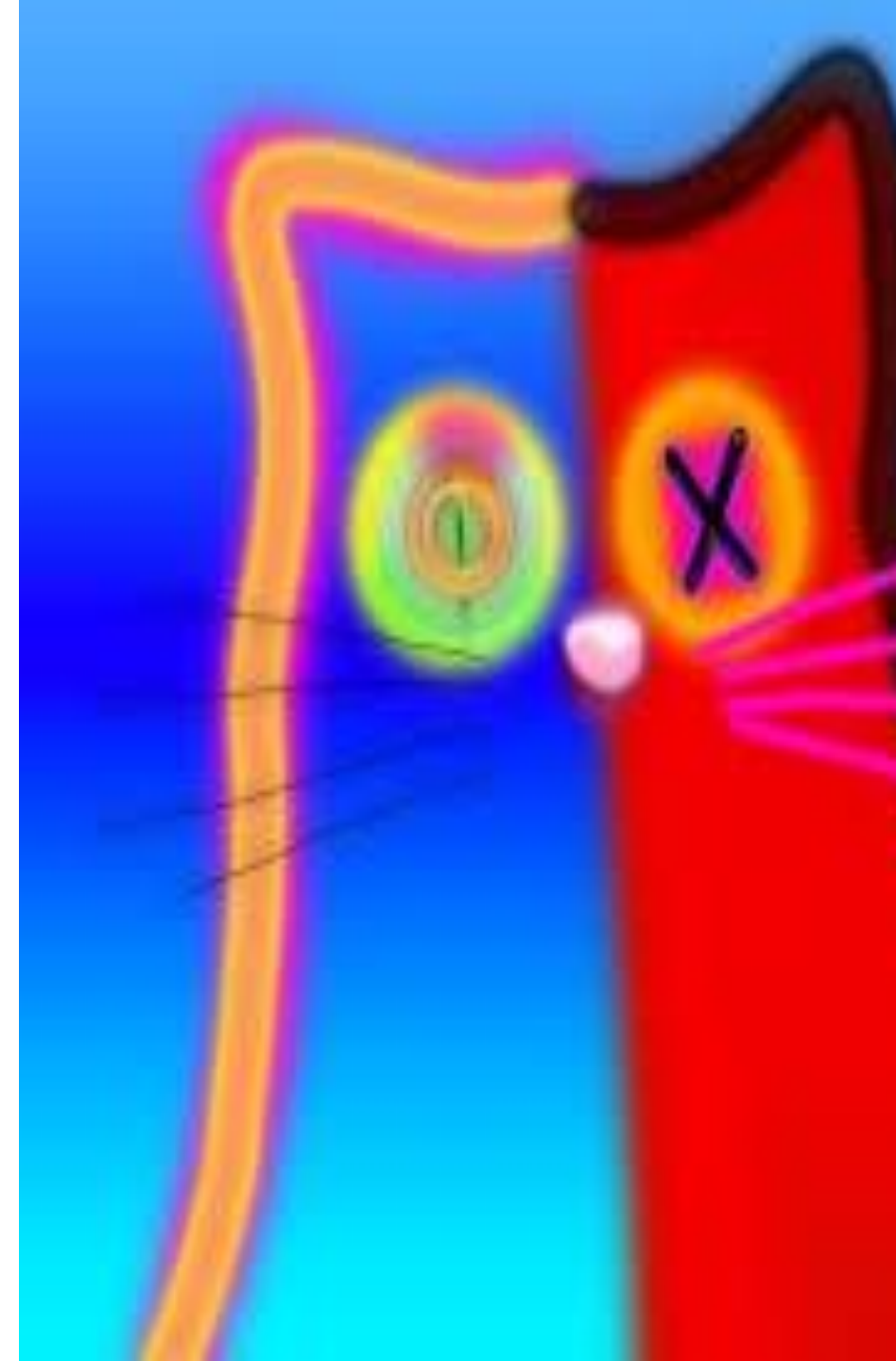
La risposta del realista alla MIP

- MIPI:
 - Il successo di una teoria non indica la sua verità
- Risposta del realista
 - **Restringiamo (opportunamente) il realismo:**
 - Teorie, anche passate, hanno componenti responsabili per il loro successo; se queste componenti sono preservate nel cambio di teoria, allora la MIP viene sconfitta
 - Es.: realismo strutturale, realismo delle entità, realismo esplicativo....



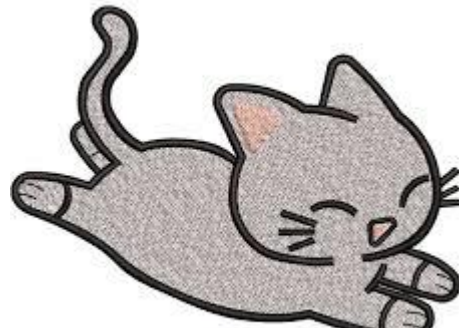
Nuovi argomenti "quantistici" contro il RS

- **MQ unitaria - Schrödinger 1926**
- **1- descrizione completa = stato quantistico** →
Raggio nello spazio di Hilbert; quando è funzione della posizione → funzione d'onda ψ
- **2- evoluzione temporale** dello stato quantistico →
equazione di **Schrödinger**
- **MQ e RS:**
 - Alcuni sostengono che la MQ generi nuovi problemi per il RS che non sono risolvibili; quindi, **dobbiamo abbandonare il RS**
 - La MQ non può dirci **come** è fatto il mondo; ci può solo dire quello che ci **possiamo aspettare** quando facciamo esperimenti



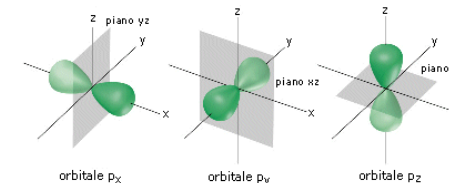
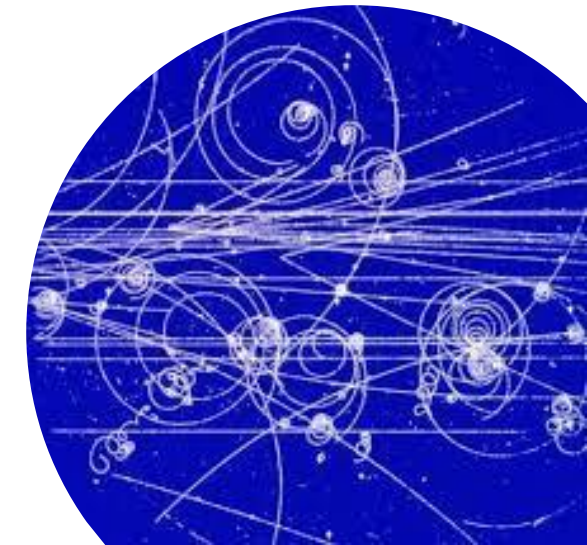
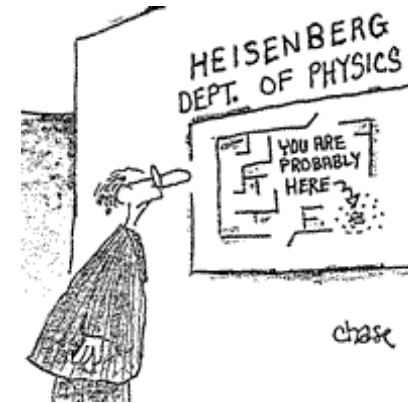
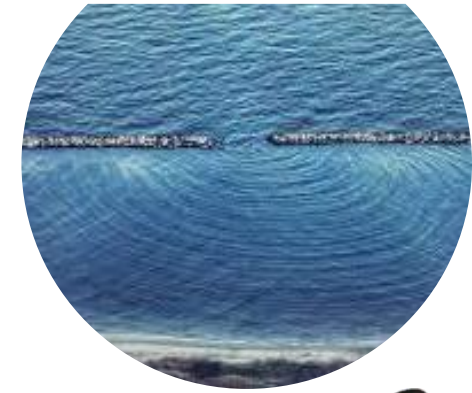
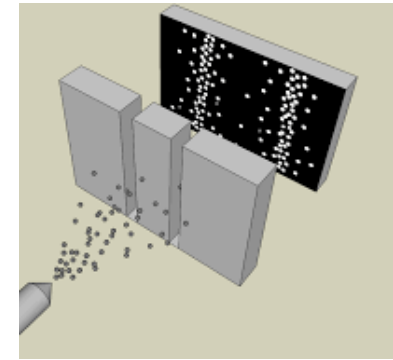
Antirealismo quantistico

- Varie versioni:
- La realtà microscopica (non osservabile) **non è conoscibile:**
 - possiamo avere accesso solo ai dati sperimentali
- «L'esperienza non ci permette mai di affermare che una quantità fisica abbia un valore definito, ma solo che una quantità fisica ha un valore definito per un dato osservatore» (von Neumann)
- La realtà microscopica (non osservabile) **non esiste:**
 - l'osservatore crea quello che osserva
 - L' **atto di osservare** assegna valori definitive alle varie quantità fisiche
 - "La luna non esiste quando non la guardo" (semi-citazione di Einstein)
- Come siamo arrivati a credere che le cose stiano così?



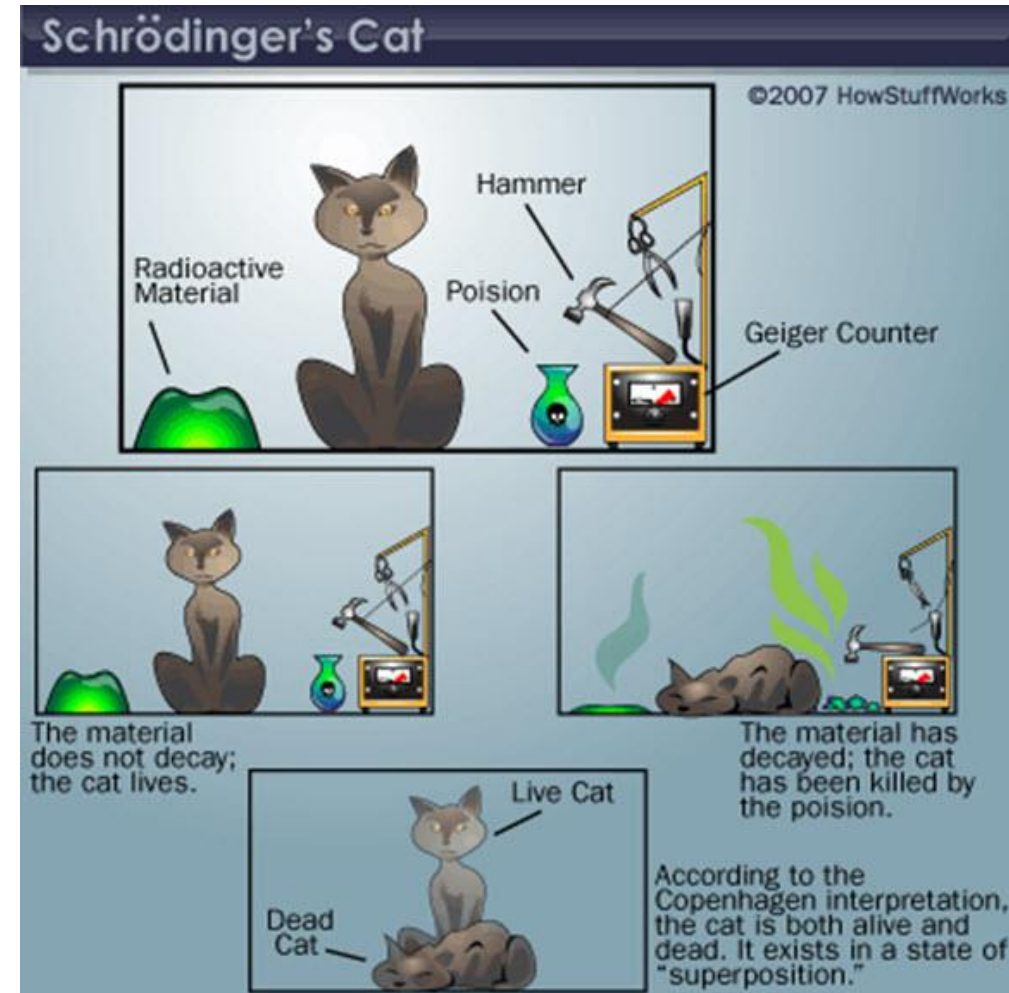
Origini dell'antirealismo quantistico

- Una breve storia della MQ
- Fine 1800: la materia è fatta di particelle; la luce è un'onda
 - Particelle: oggetti localizzati con una traiettoria ben definita
 - Onda: oggetto diffuso che interferisce e diffrange
- **La natura ondulatoria della luce in crisi:**
 - Effetto fotoelettrico, effetto Compton [...]
- **La natura corpuscolare della materia in crisi:**
 - **1-Esperimenti:** interferenza e diffrazione con particelle
 - **2-Aspetti teorici**
 - Principio di indeterminazione di Heisenberg
 - Meccanica ondulatoria di Schrödinger



Origini dell'antirealism quantistico

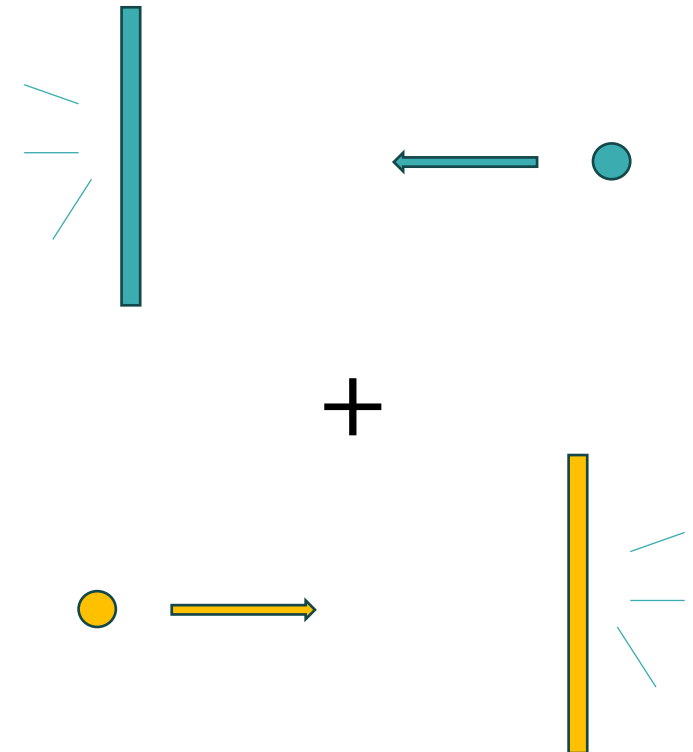
- Proposta (Schrödinger) : **'particelle'=pacchetti d'onda**
- Ragioni per pensare che **non funzioni**:
- A-**sparpagliamento** (1926) → empiricamente inadeguato: non dovremmo vedere traiettorie definite (e invece le vediamo)
- B-**il problema del gatto** (1935) →
- Le onde si sovrappongono
- In circostanze opportune, formano **sovrapposizioni macroscopiche non osservate**
- GATTO "VIVO e MORTO"



$$\frac{1}{\sqrt{2}}|\text{cat alive}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{cat dead}\rangle$$

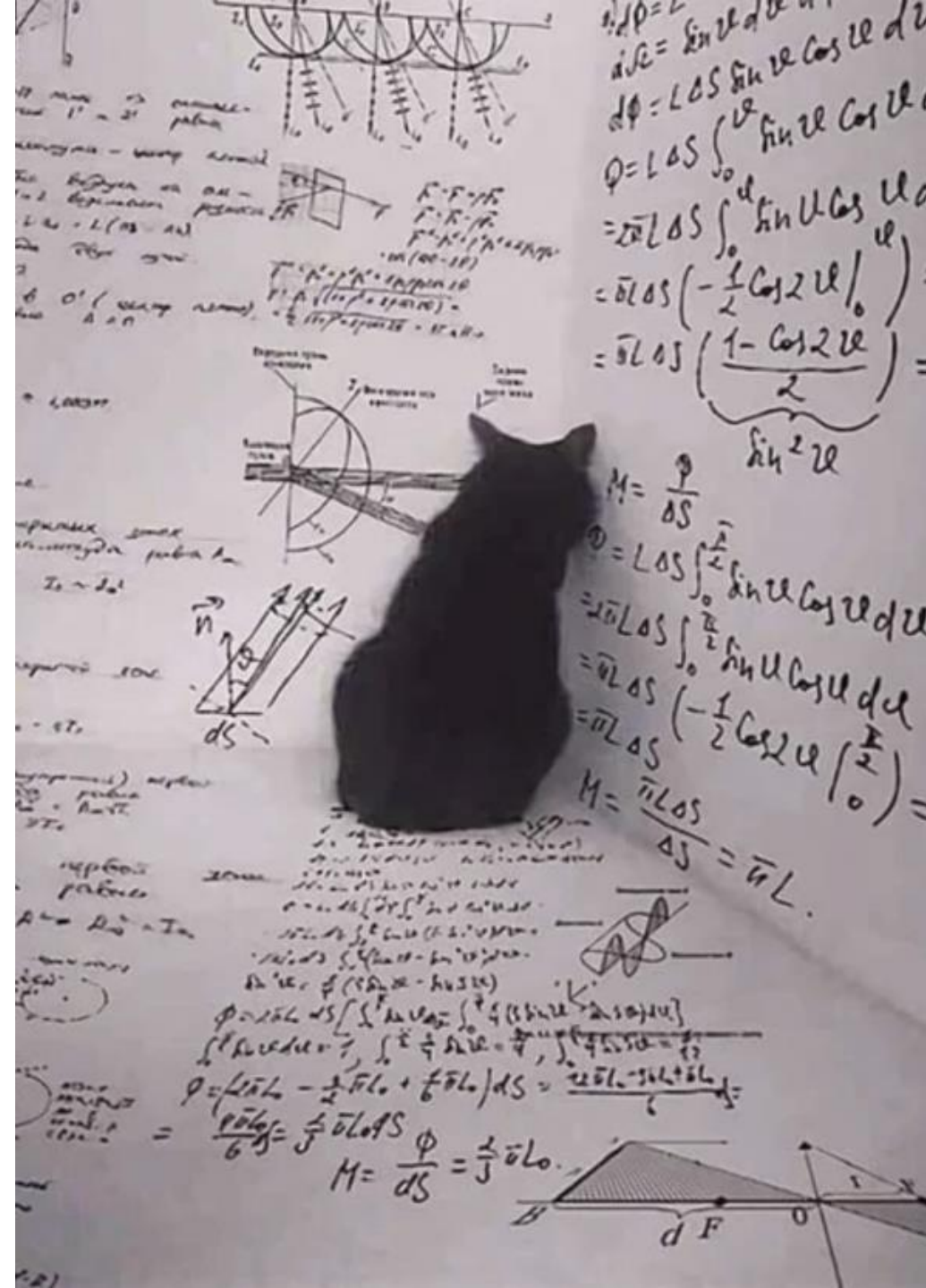
Il problema della misura

- Come mai il problema del gatto viene anche chiamato problema della misura (PM) :
- Una sorgente emette una particella → sovrapposizione tra SINISTRA e DESTRA
- **Sovrapposizione macroscopica:**
- [Uno schermo che rileva una particella a DESTRA] & [Uno schermo che rileva una particella a SINISTRA]
- E noi **non la osserviamo mai**



Il problema della misura – formulazione tradizionale

- Le seguenti sono **incompatibili**:
 - 1) la funzione d'onda fornisce la descrizione **completa** di ogni sistema fisico
 - 2) la funzione d'onda evolve secondo l'equazione di **Schrödinger**
 - 3) le misure hanno **risultati definiti**
- Per rendere la MQ compatibile con il RS **si deve risolvere il problema della misura**
- Teorie che **negano almeno una** delle precedenti sono soluzioni del PM e quindi sono in grado di informarci sulla struttura fondamentale della realtà (**ONTOLOGIA**)



La MQ assiomatica resolve il PM

- La MQ nei libri di testo \leftrightarrow **MQ assiomatica**
 - **1- descrizione completa = stato quantistico**
 - **2- osservabili = proprietà misurabili \rightarrow operatori auto-aggiunti**
 - **3a- IN ASSENZA DI MISURE, evoluzione di Schrödinger**
 - **3b- QUANDO C'E' UNA MISURA, regola del collasso di von Neumann** – quando si “misura l'operatore A” :
 - \rightarrow valori possibili = autovalori di A
 - \rightarrow funzione d'onda collassa nell'autostato di A corrispondente al valore trovato a
 - **4- regola di Born** = “Prob (autovalore a)=|coefficiente davanti all'autostato corrispondente ad a|²”
- MQA **RISOLVE IL PM**: Non ci sono spvrapposizioni macroscopiche non osservate perché interviene la regola del collasso
 - Empiricamente adeguata
 - Ma è **VAGA**:
 - Che cos'è una misura? Che cos' è un osservatore? Perché per loro le leggi fisiche sono differenti?



The observer?



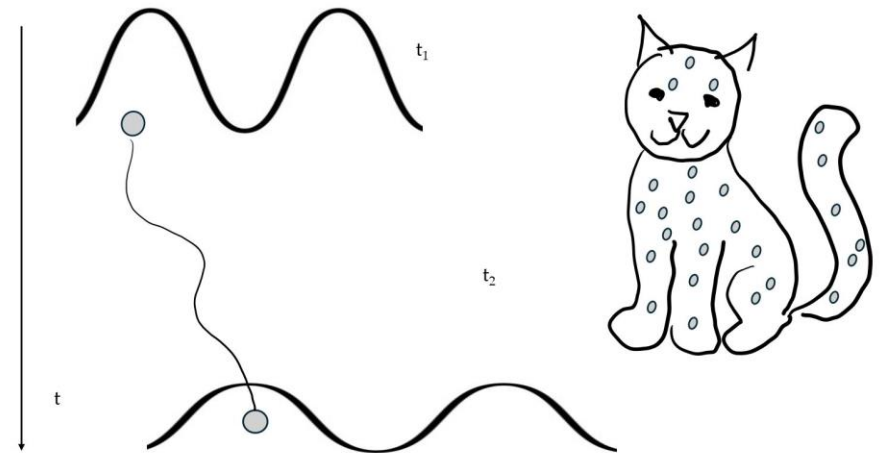
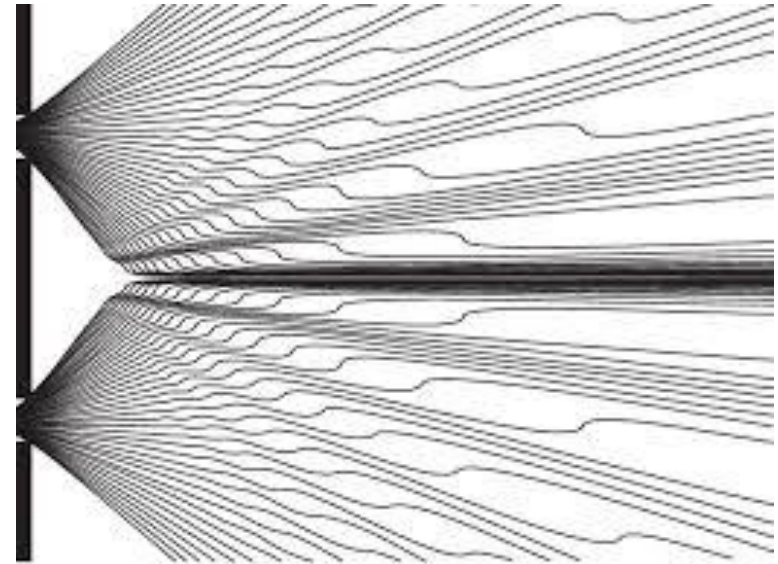
Soluzioni migliori del PM

- **Teoria dell'onda pilota** (meccanica Bohmiana, Teoria di de Broglie-Bohm): nega 1 = la funzione d'onda non è completa
 - (configurazioni delle particelle; funzione d'onda);
 - Evoluzione di Schrödinger per la funzione d'onda; equazione di guida per le particelle
- **Teorie di localizzazione spontanea** (collasso spontaneo, GRW): negano 2: la funzione d'onda non evolve secondo l'equazione di Schrödinger
 - Evoluzione nonlineare e stocastica per la funzione d'onda
- **Molti mondi** (meccanica di Everett) : nega 3: le misure non hanno risultati definiti
 - Evoluzione di Schrödinger per la funzione d'onda; tutti i termini della sovrapposizione sono "reali"



Un'occhiata più approfondita alle ontologie quantistiche

- **Onda pilota**
 - (configurazioni delle particelle; stato quantistico);
 - Evoluzione di Schrödinger per la funzione d'onda; equazione di guida per le particelle
- Ontologia (fondamentale): **particelle nello spazio, che si muovono nel tempo**
- La funzione d'onda 'guida' il moto delle particelle
- Gli oggetti macroscopici sono composti da particelle microscopiche
- ... ricorda un modo di comprendere le cose 'classico'...



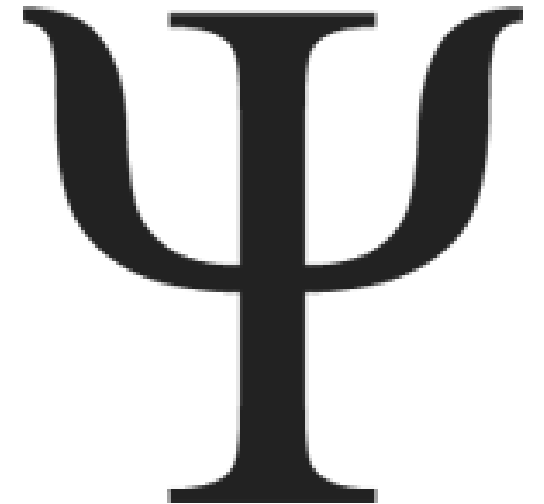
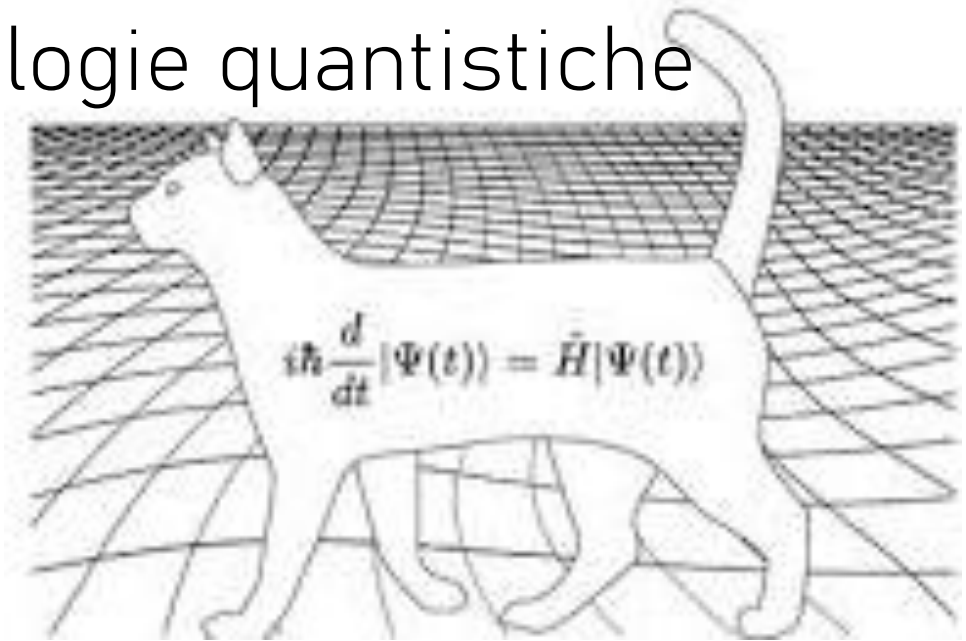
Spiegazione in meccanica classica

- **Meccanica classica (MC):**
 - Ontologia (chiaramente stipulata) = particelle puntiformi, microscopiche
 - Evoluzione temporale: legge di Newton
- **Spiegazione in MC: “visualizzabilità” = si possono fare disegni**
 - **Compositionalità** = ogni cosa è fatta di particelle
 - **Proprietà macro** = in termini della dinamica micro
- **Stile esplicativo “alla Lego”**
 - **→ lo stesso vale per la teoria dell’onda pilota!**



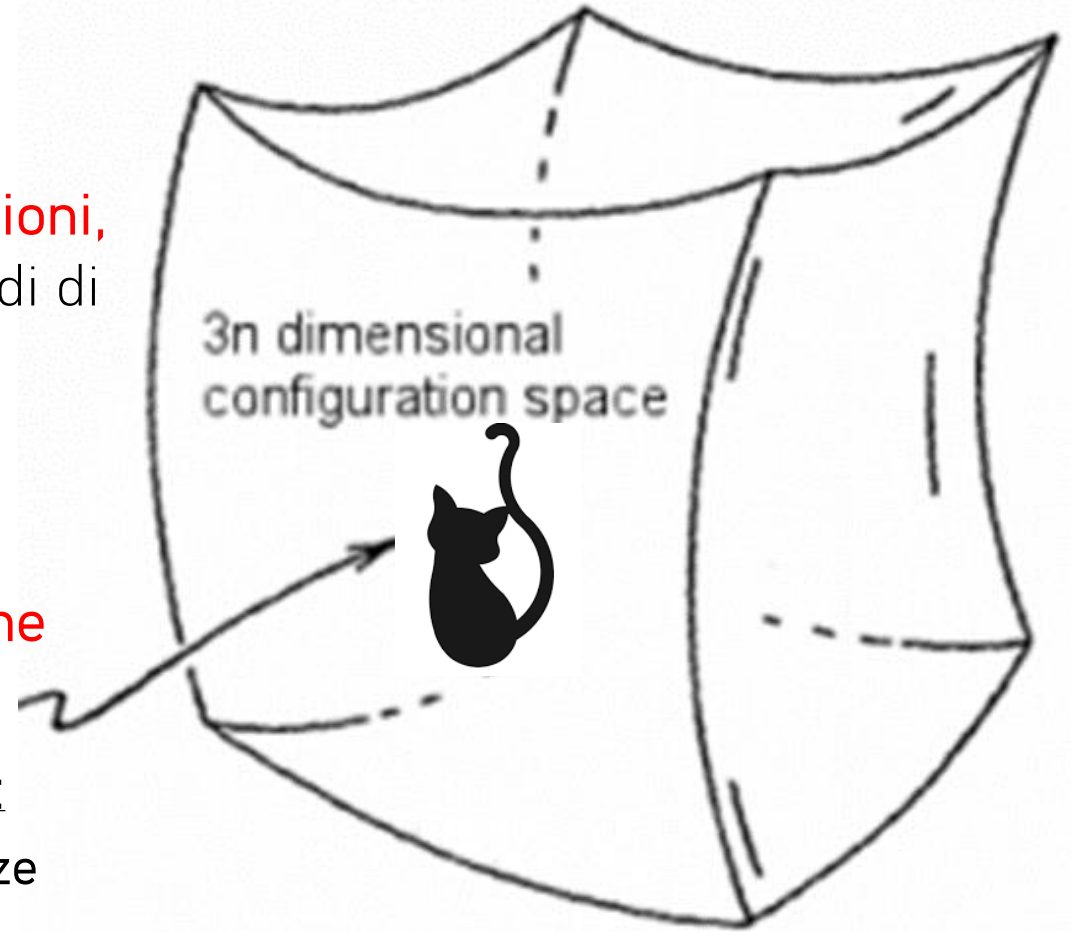
Un'occhiata più approfondita alle ontologie quantistiche

- Tutte le soluzioni del PM eccetto l'onda pilota sono state considerate come teorie con una ontologia di funzione d'onda
 - **La funzione d'onda è ciò che è fondamentale**
- Argomento preliminare a favore di questa visione:
 - Considera l'equazione di evoluzione temporale principale di una teoria; l'ontologia è quello di cui l'equazione prescrive l'evoluzione
 - In MC, l'equazione di Newton descrive l'evoluzione di particelle tridimensionali puntiformi → quindi esse sono l'ontologia della MC
 - Per analogia, nelle teorie di localizzazione spontanea e dei molti mondi l'equazione di Schrödinger (o la sua modifica) descrivono l'evoluzione della funzione d'onda, quindi la funzione d'onda è l'ontologia di queste teorie
- (Altri argomenti:
 - Spiega naturalmente l'entanglement
 - Fornisce un'ontologia locale e separabile nello spazio fondamentale)



Che cosa rappresenta la funzione d'onda?

- La funzione d'onda è una funzione di $3N$ parametri (le configurazioni delle 'particelle')
- → è un campo che vive sullo spazio delle configurazioni, la cui dimensione è $3N$ (N = numero di 'particelle'=gradi di libertà della funzione d'onda)
- QUINDI: Lo spazio fondamentale ha dimensione $3N$; l'ontologia è un campo in questo spazio
- L'ontologia è ondulatoria, ma anche ad alta dimensione
- Anche se queste teorie risolvono il PM (niente sovrapposizioni macro), hanno comunque bisogno di:
 - Speigare da dove venga lo spazio 3d delle nostre esperienze
 - Che tipo di spiegazione danno dei fenomeni?



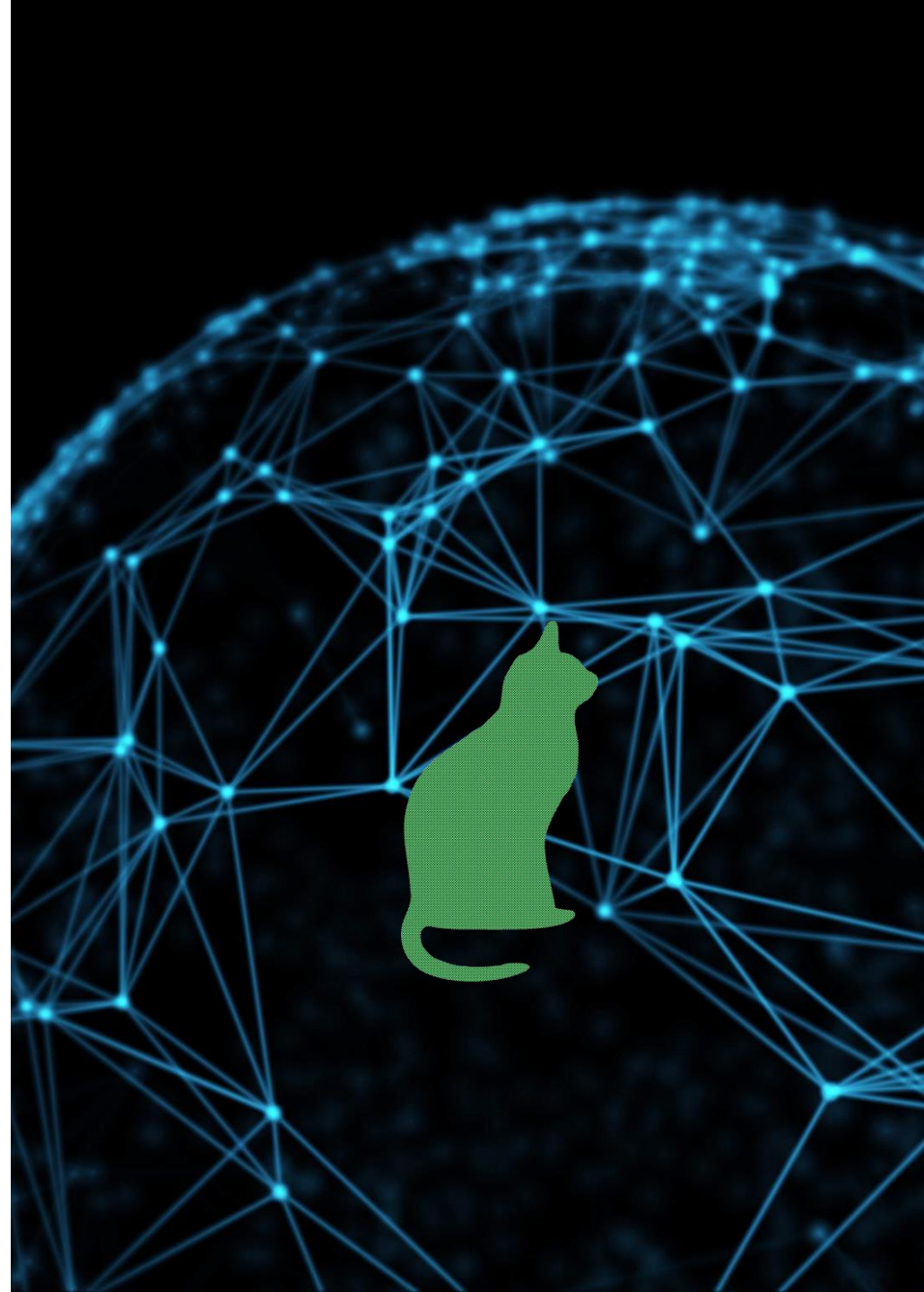
Spiegazioni costruttive

- Classificazione di tipi di teorie (Einstein 1948)
 - Teorie costruttive e teorie di principio
 - $\leftarrow \rightarrow$ spiegazioni costruttive e spiegazioni di principio
 - Teorie costruttive (stile Lego)
 - Micro ontologia spaziotemporale \rightarrow mattoncini costitutivi fondamentali
 - Composizionalità e spiegazione dinamica
 - Oggetti macro sono fatti da oggetti micro
 - Comportamento macro completamente specificato dalla dinamica micro
- \rightarrow Dal basso all'alto (Bottom-up)



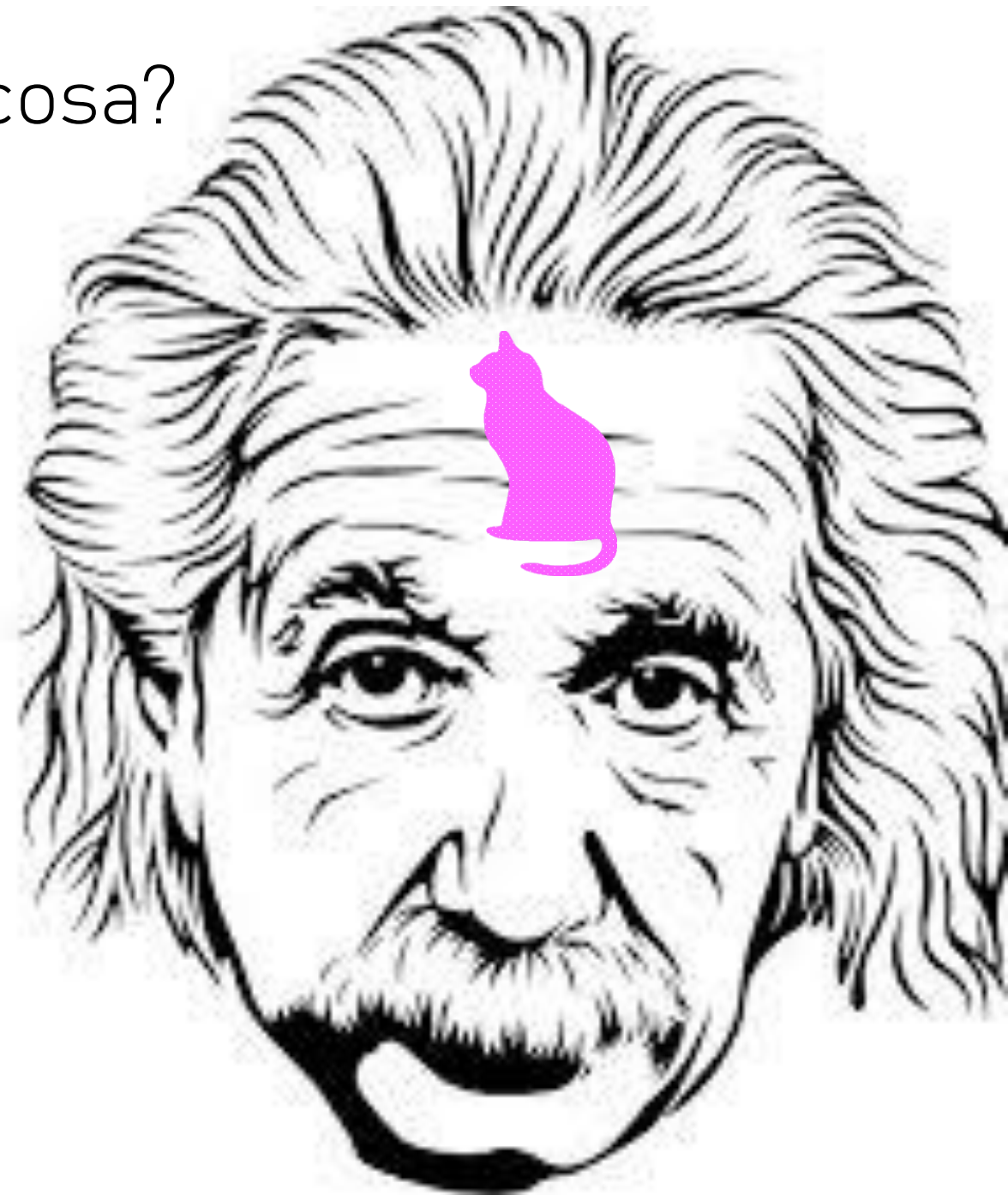
Teorie di principio

- **Teorie di principio**: principi che vincolano i processi possibili
- ~ teorie cinematiche
 - Perché la loro spiegazione **non è in termini della dinamica e non coinvolge interazioni**
 - **→ dall'alto al basso (Top-down)**
 - Es: termodinamica
 - Teorie costruttiva corrispondente: Teoria cinetica
- **Le teorie di principio spiegano:**
 - Quello che ci dobbiamo aspettare; aspettati fenomeni che non violino i principi della teoria
- **Le teorie costruttive spiegano:**
 - Perché ci dobbiamo aspettare queste cose



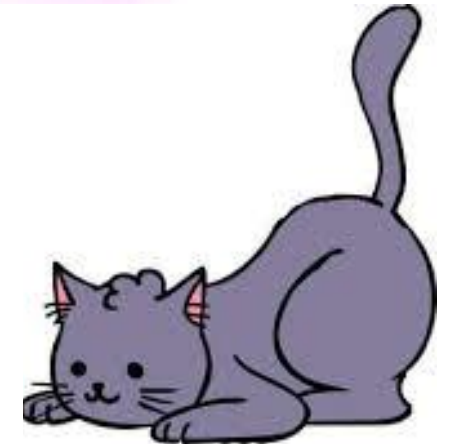
Chi dovrebbe preoccuparsi di cosa?

- RS: le nostre migliori teorie ci dicono **come è fatto il mondo**, non solo quello che ci dovremmo aspettare di vedere nel prossimo esperimento
- Quindi, il RS dovrebbe andare alla **ricerca di una teoria costruttiva**, andando oltre le teorie di principio
 - Solo le teorie costruttive ti dicono perché un certo principio sia vero e perché ti dovresti aspettare certi risultati
 - **Sono più profonde**
 - Einstein:
 - Le teorie di principio sono provvisorie
 - Le accettiamo solo se non c'è niente altro



Teorie quantistiche costruttive

- Ritorniamo alle varie ontologie
- La MC è costruttiva
- **La teoria dell'onda pilota è anch'essa costruttiva:**
 - **Composizionalità** = oggetti macro composti da oggetti micro (le particelle)
 - **Riduzione dinamica** = le proprietà macro e il comportamento macro viene spiegato in termini di dinamica micro



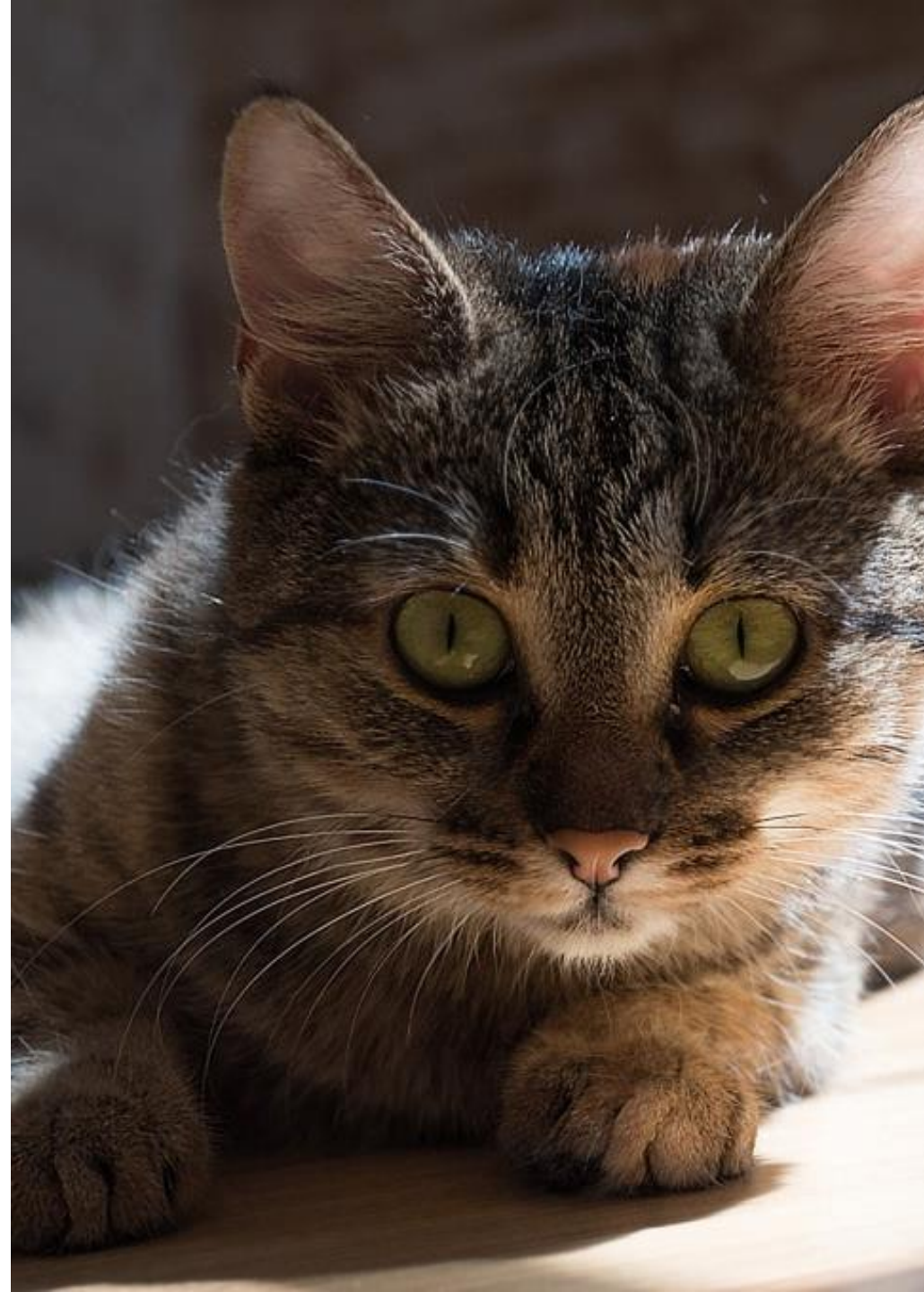
Teorie della funzione d'onda come teorie di principio

- **Le teorie della funzione d'onda forniscono spiegazioni che sono degli ibridi dinamici non-costruttivi (~teorie di principio)**
- Spazio fondamentale = spazio delle configurazioni
- Lo spaziotempo e gli oggetti al suo interno = **emergono** in maniera non fondamentale
- **1-Emergenza attraverso dei principi che spiegano:**
 - Perché ci dobbiamo aspettare di osservare un **mondo 3d**
 - Albert: il numero di dimensioni nell'Hamiltoniana (3) è privilegiato
 - Ney: il numero di dimensioni che rispetta le simmetrie della dinamica (3) è privilegiato
 - Carroll (realismo dello spazio di Hilbert): il numero di dimensioni che permettono la decomposizione più semplice dello spazio di Hilbert in sottosistemi (3) è privilegiato.
 - Perché ci dobbiamo aspettare ad un certo livello **oggetti micro in 3d**
 - Albert e Loewer: modifica la Eigenvalue-Eigenstate Rule per ridefinire particelle 3d in termini della loro posizione
 - Albert: micro particelle 3d sono 'ombre funzionali' della funzione d'onda ad alta dimensione
 - Ney: micro particelle 3d sono dei 'bozzi' nella funzione d'onda
- **2-Composizionalità per spiegare gli oggetti macro in 3d**



MQA come teoria di principio

- **Le teorie di principio tipicamente piacciono agli antirealisti**
- MQA è una teoria di principio: gli assiomi sono i principi
- **La spiegazione in MQA: "attendibilità (expectability)"** = ci dice cosa ci dovremmo aspettare di osservare
 - Presumibilmente, una delle ragioni per cui ad Einstein non piaceva
 - Compatibile con la sua idea che la MQA fosse incompleta
 - Compatibile con la sua interpretazione statistica della funzione d'onda:
 - La MQA necessita una teoria costruttiva (attualmente sconosciuta) che le dia fondamento
- **Perché i principi sono veri???**
 - All'antirealista non interessa, ma il RS se ne dovrebbe occupare...



Teorie quantistiche costruttive e di principio

- Opinione personale mia: si dovrebbe pensare alla teoria dell'**onda pilota** come alla **teoria costruttiva che sottende la MQA**
- Così come la meccanica statistica è la teoria costruttiva che sottende la termodinamica

Dinamica mirco



Principi della termodinamica

Dinamica micro



Principi della MQA



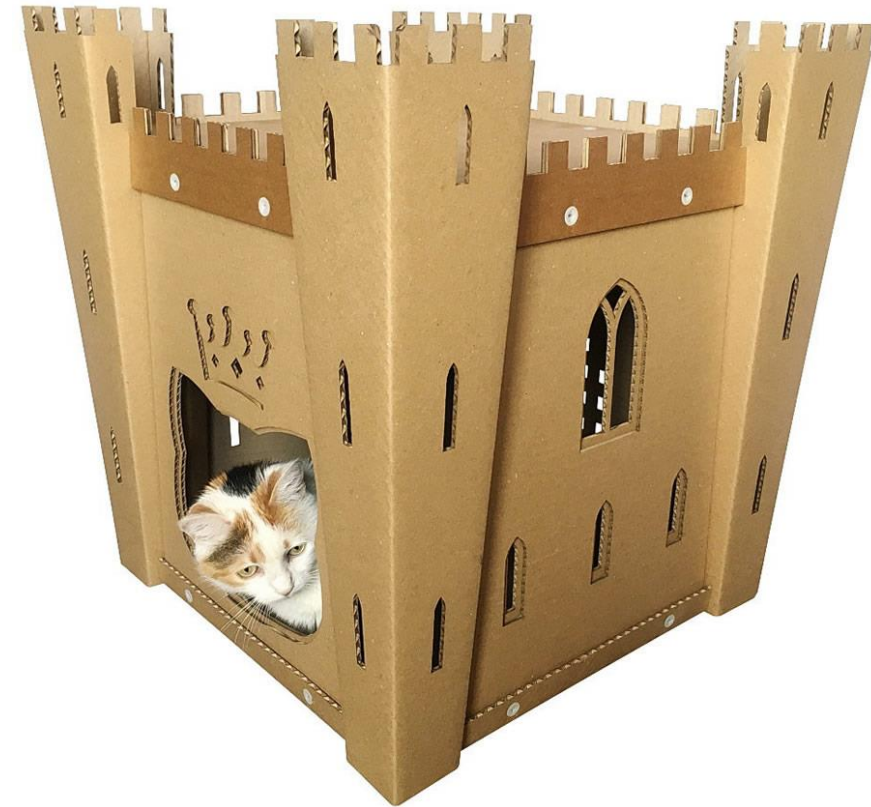
Che cosa è necessario per una comprensione costruttiva?

- L'ontologia (le cose fondamentali) deve:
 - Essere nello **stesso spazio** dei fenomeni che deve spiegare
 - I fenomeni sono nello **spazio-tempo**; quindi l'ontologia deve essere anche lei spaziotemporale
 - Altrimenti, ci sarebbe un principio senza spiegazione per connettere l'ontologia allo spazio tempo
 - Essere **microscopica**
 - Altrimenti, non si avrebbe più una spiegazione alla Lego
- Questo è il cosiddetto approccio dell'ontologia primitiva (Allori, DGTZ, ...):
 - **Tutte le teorie fisiche fondamentali necessitano una ontologia microscopica spatio-temporale**



Che cosa è necessario per una comprensione costruttiva?

- Analogia: stesso spazio...
 - I mattoncino Lego individuali (l'ontologia fondamentale) che costruiscono un castello (un fenomeno macroscopico) sono nello stesso spazio del castello (lo spaziotempo) e sono più piccoli del castello (microscopici)
- ... ma concetti differenti:
 - Un RS dovrebbe voler **ridurre la termodinamica alla MC** per ottenere una spiegazione più profonda
 - **Assurdo usare il gas come ontologia nella teoria riducente (la MC)**
 - **Nuovi concetti**: dai gas con P , V , e T , alle particelle con m , x , v
 - Similmente, un RS dovrebbe voler **ridurre la MQA ad una teoria costruttiva più profonda**
 - **Assurdo usare la funzione d'onda come ontologia nella teoria riducente**
 - Non è neanche nello stesso spazio
 - **Nuovi concetti**: dalla funzione d'onda con ampiezza e fase, a ...



Il PM è una falsa pista (red herring)

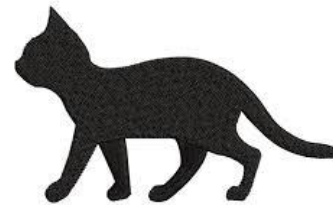
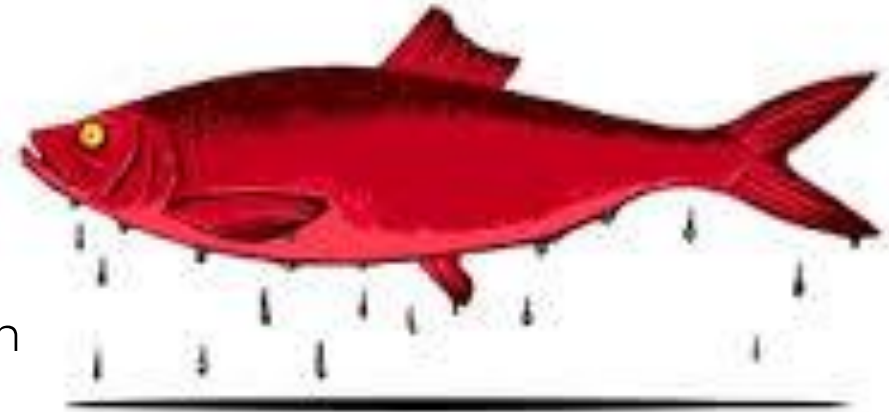
- Se si cerca una teoria costruttiva:
 - : La funzione d'onda non può essere l'ontologia, (perché non è nello spazio-tempo)
 - Nel qual caso, **risolvere il PM non è sufficiente per avere una compatibilità' con il RS**
 - GRW e MW risolvono il PM ma se le consideriamo come teorie della funzione d'onda allora non hanno un'ontologia spaziotemporale, e quindi non possono dare una spiegazione costruttiva
- Chi cerca una teoria costruttiva \leftrightarrow **risoluzione del problema della completezza**
 - Tutte le teorie che risolvono il PM eccetto l'onda pilota sono incomplete/ **hanno bisogno di essere completate con una opportuna ontologia spaziotemporale microscopica:**
 - GRW \rightarrow GRW_{m,f,p}
 - MW \rightarrow MW_{m,f,p}



Il PM è una falsa pista (red herring)

- Torniamo al PM:
- L'evoluzione lineare di S per la funzione d'onda + la funzione d'onda è completa → sovrapposizioni macro non osservate
- QUESTO PROBLEMA NON HA NIENTE A CHE FARE CON LA REALTÀ MICROSCOPICA, **HA A CHE FARE CON QUELLO CHE OSSERVIAMO O MENO**
- Questo è un problema (di sicuro) per l'antirealista:
 - Si può non interessare di quale sia la realtà sottostante...ma non può ignorare questo problema, che è **un problema di adeguatezza empirica**
 - Tutti, incluso l'antirealista, devono risolverlo
 - E infatti lo risolve, con il collasso di vN

THE RED
HERRING



Il PM è una falsa pista (red herring)

- Risolvere il PM è il **requisito minimo** affinché una teoria sia accettabile: se non lo risolviamo, **la teoria è falsificata**
- Storicamente, fu introdotto da Einstein e Schrödinger come **l'ultima risorsa** per convincere il loro 'amici' che non potessero ignorare che la MQ fosse empiricamente inadeguata
- Il PM è un problema di adeguatezza empirica



Il PM è una falsa pista (red herring)

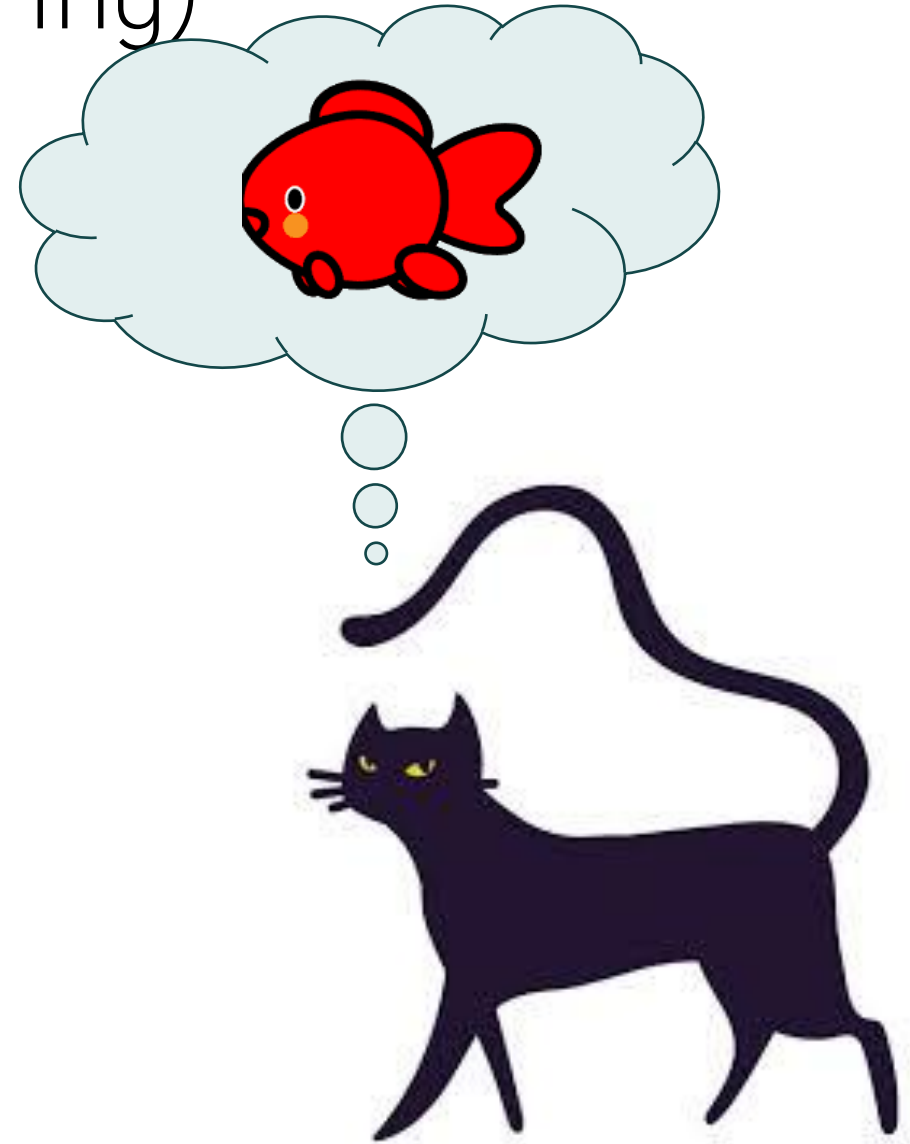
- Ma il **RS 'costruttivo' vuole di più** di questo:
 - Un RS dovrebbe anche preoccuparsi di **trovare l'ontologia fondamentale**, in virtù del quale poi si possa spiegare perché certi fenomeni accadono
- Quindi, una teoria che resolve SOLO il PM può non essere abbastanza
- Per avere una spiegazione **costruttiva**, la MQ ha bisogno una **ontologia spaziotemporale microscopica**
- = la Teoria deve risolvere

Il problema della completezza



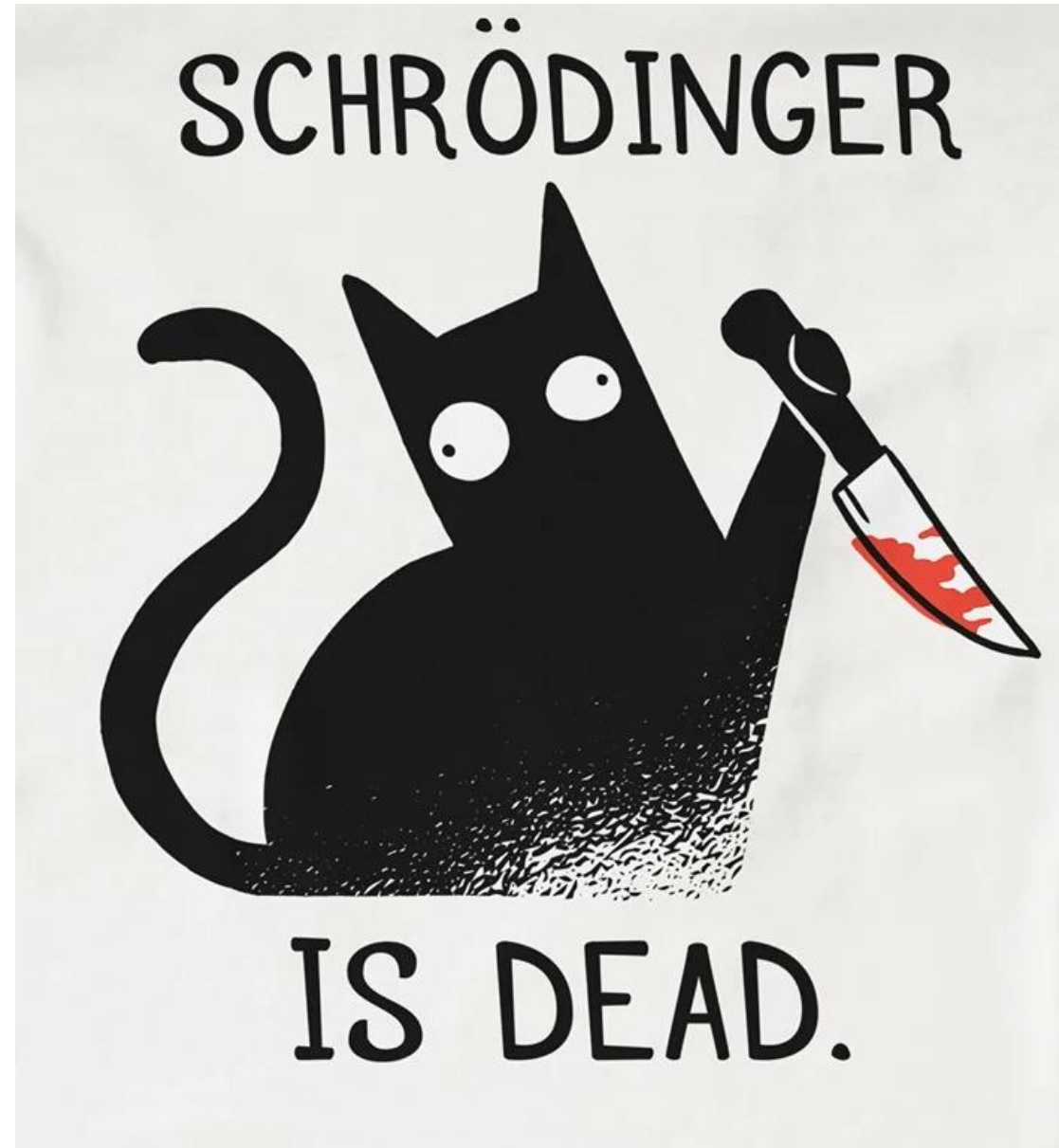
Il PM è una falsa pista (red herring)

- Einstein e Schrödinger (e altri, come Lorentz, de Broglie, ecc.) continuarono a protare argomenti che la **MQ è incompleta**. Però, furono inefficaci perché avevano di fronte degli antirealisti
- 1926: **argomento del campo non fisico**: se la MQ fosse completa allora avrebbe come ontologia un campo nello **spazio delle configurazioni**; questo è nonfisico perché non è nello spaziotempo; quindi la MQ è incompleta
- Questo è il mio punto: **Questo è quello a cui un RS dovrebbe essere sensibile**
- **Ma il tipo fisico del tempo non era un RS:**
 - Si preoccupava solo di riprodurre i fenomeni senza comprenderli costruttivamente



Il PM è una falsa pista (red herring)

- 1935: **PM**: se la MQ fosse completa, ci sarebbero **sovrapposizioni macroscopiche non osservate**
 - Anche questo argomento non funzionò perché il collasso di ψ risolve questo problema
 - La regola del collasso **non è soddisfacente solo per il RS** che pensa che le misure siano dei processi fisici come gli altri
 - In ogni caso, **per qualche ragione**, questo è il problema su cui si sono focalizzati tutti quanti i RS (invece del problema della completezza)
 - Ma il RS si dovrebbe concentrare sul problema della completezza: è solamente perché uno ha in mente una teoria costruttiva che considererà il PM non risolto dalla regola del collasso



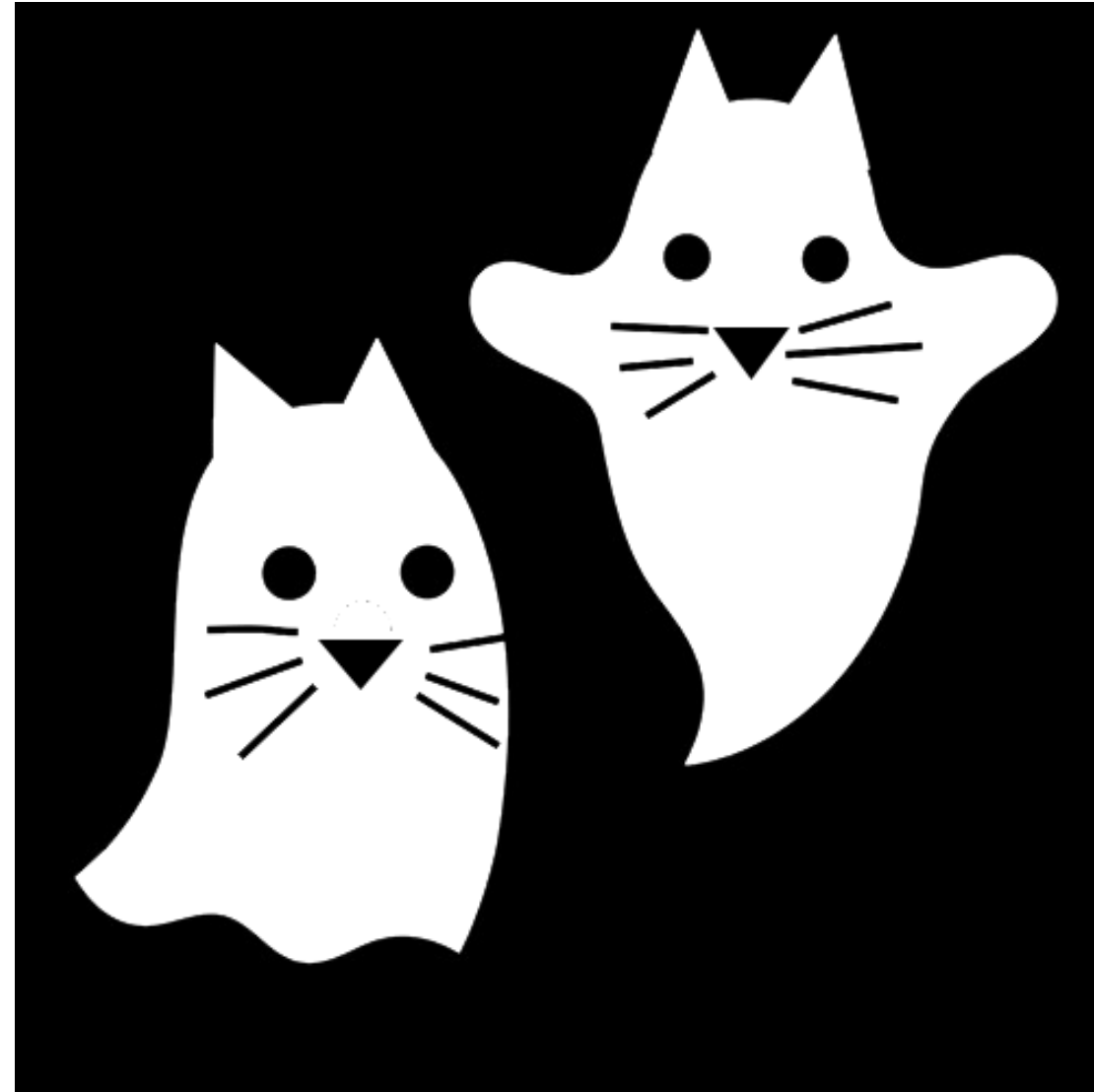
Noi abbiamo una teoria quantistica costruttiva: la teoria dell'onda pilota ...

- Einstein (il prototipo del RS) ne era a conoscenza, ma non era particolarmente soddisfatto da questa teoria.... **Come mai?**
- Presumibilmente, perché è **nonlocale**:
- **Località** (=causalità locale)= **le interazioni si propagano nello spazio in maniera continua a velocità finita**
- E' sempre stata un'assunzione in fisica prima della MQ
 - Per descrivere sistemi come isolate; per identificare la causa e l'effetto
 - La teoria della gravitazione di Newton è nonlocale, ma
 - La sua forza decresce velocemente con la distanza relativa → per tutti gli scopi pratici, possiamo trascurarle gli effetti su oggetti lontani
 - Relatività → nuovo limite: c è la velocità massima
- **Assumere la nonlocalità era praticamente impensabile prima del 1981...**



Noi abbiamo una teoria quantistica costruttiva: la teoria dell'onda pilota ...

- L'argomento **EPR** voleva mostrare che la MQA era incompleta perché il collasso è nonlocale
- 1935: **argomento della nonlocalità** (EPR): se la MQA fosse completa allora sarebbe nonlocale (a causa del collasso). Questo è inaccettabile. Quindi la MQA è incompleta
- Nella Teoria dell'onda pilota la nonlocalità è **inserita direttamente nella funzione d'onda**, dato che è una funzione di tutte le particelle → per Einstein questo era inaccettabile
 - L'argomento avrebbe potuto funzionare e convincere che la MQA fosse incompleta, ma è stato frainteso dai più per il modo in cui era stato scritto
 - Anche se **Heisenberg lo comprese** e argomentò che questa nonlocalità **non era in contrasto** con la teoria della relatività, a patto di pensarla **strumentalmente**, come una teoria di segnali



Noi abbiamo una teoria quantistica costruttiva: la teoria dell'onda pilota ...

- Sviluppi
- 1964: diseguaglianza di Bell
 - Una teoria quantistica locale con una ontologia spaziotemporale soddisfa una certa diseguaglianza, mentre la MQA no
- 1981: **esperimenti di Aspect:**
 - Le predizioni della MQA risultano corrette (e anche quelle della teoria dell'onda pilota...)
- **→ tutte le teorie quantistiche devono essere nonlocali**
 - Dato che adesso non abbiamo opzioni, e la realtà è nonlocale, sembra ragionevole credere nella teoria quantistica più semplice (teoria deterministica di particelle), che è **esplicitamente nonlocale**
 - → la teoria dell'onda pilota
 - Che fornisce una spiegazione costruttiva del successo della MQA



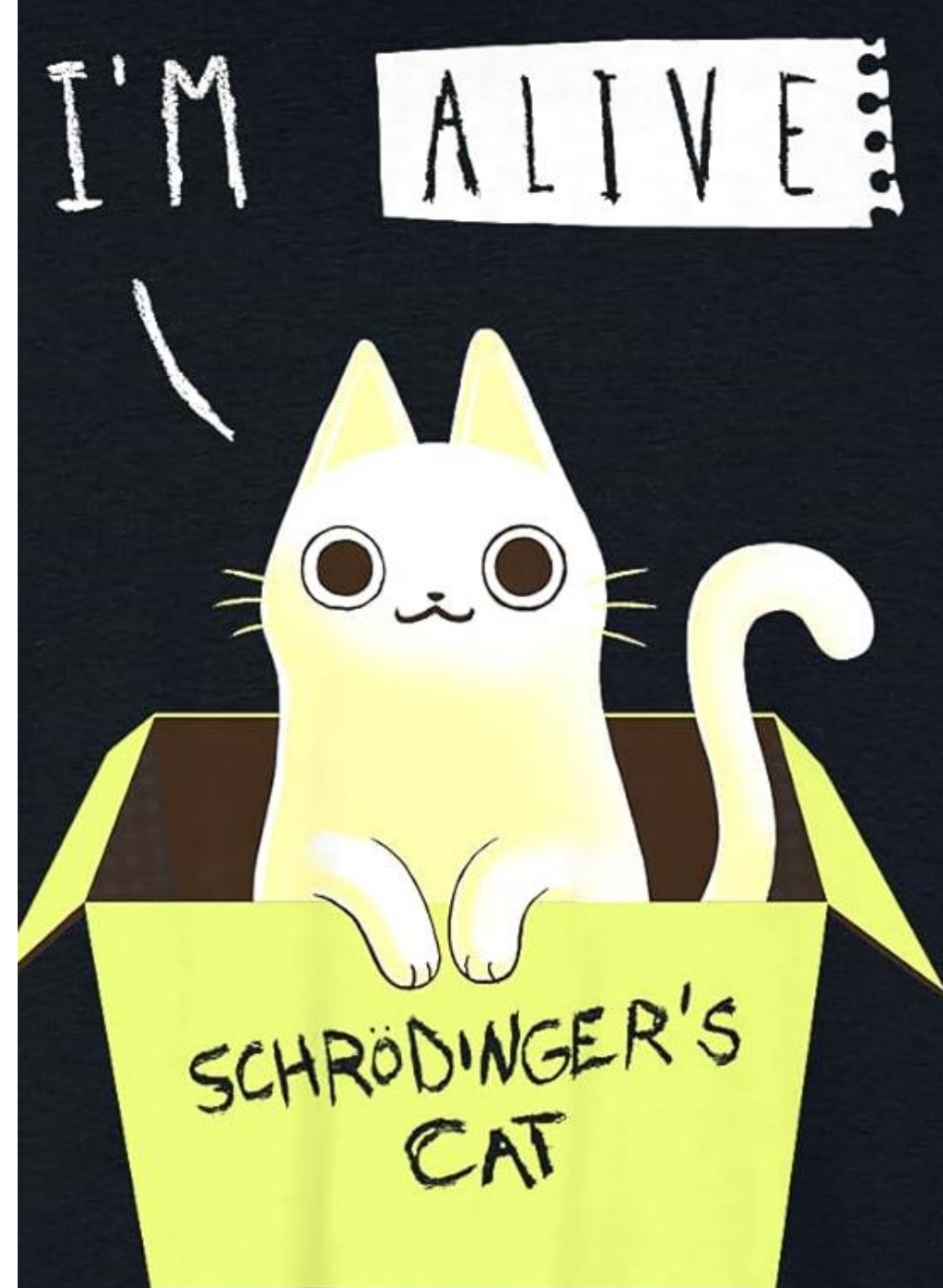
Teorie costruttive alternative?

- Naturalmente, **quante ne volete! Ma ne vale la pena?**
- Tutte necessitano una ontologia spaziotemporale:
 - Particelle, campi 3d, eventi spaziotemporali (flashes)
- Si può giocare con la legge di evoluzione:
 - Funzione d'onda che evolve secondo S
 - S_p = onda pilota
 - S_m = campo di materia \rightarrow stile molti mondi
 - S_f = ontologia di eventi (evoluzione stocastica) \rightarrow stile molti mondi
 - Funzione d'onda che evolve secondo una legge non lineare e stocastica
(nonlineare per sopprimere le sovrapposizioni, stocastica per evitare segnali superluminali)
 - GRWm=campo di materia
 - GRWf: eventi
 - GRWp: particelle....
- Ma perchè mai dovremmo preferire queste teorie? **L'onda pilota è già la teoria costruttiva più semplice** - OOMMO=Ontologia Ovvvia che si Muove in Modo Ovvio



Conclusioni

- Il RS vuole **una rappresentazione della realtà dalle nostre teorie**
- Per ottenerla, necessita una **spiegazione costruttiva**
 - Composizionalità, riduzione dinamica
- Per ottenerla, necessita di una **ontologia microscopica spaziotemporale**
 - **La MQ ha bisogno di essere completata**: la funzione d'onda non può fornire una comprensione costruttiva dei fenomeni
- **Risolvere il PM non dovrebbe essere sufficiente per il RS**, perché risolvere il PM richiede solo di usare un linguaggio preciso
 - Infatti, GRW0, MW sono teorie della funzione d'onda
 - Forniscono **spiegazioni di principio** che sono deboli per il RS
 - Se ci si dimentica del PM e si cerca l'ontologia microscopica spaziotemporale migliore, **si arriva immediatamente alla teoria dell'onda pilota**
 - Perché dovremmo esplorare oltre?
 - **PROSSIMO PASSO: CAPIRE LA NONLOCALITA'...**



Grazie!

