

**Osservazioni di teoria dei quanti sull'esperimento
di Stern e Gerlach¹**

A. Einstein a Berlino e P. Ehrenfest a Leida

(ricevuto il 21 agosto 1922)

§ 1. O. Stern e W. Gerlach² fanno volare un fascio di vapore di atomi d'argento attraverso un campo magnetico per determinare se gli atomi posseggano un momento magnetico e, in caso affermativo, quale orientazione risulti agli stessi in seguito all'attraversamento del campo magnetico. Il loro esperimento dà luogo ad un risultato assai significativo: il momento magnetico di tutti gli atomi a seguito dell'attraversamento del campo coincide con la direzione delle linee di forza, e in particolare per circa metà degli atomi nel senso del campo, per l'altra metà nel senso opposto. Ciò comporta naturalmente la domanda, in che modo gli atomi pervengano a questo orientamento.

§ 2. Si deve osservare innanzitutto che gli atomi durante la loro permanenza nel campo deviante non compiono alcuna collisione - le ultime collisioni si verificano nello spazio riempito dai vapori del fornetto di fusione.

Domandiamoci in primo luogo, come atomi magnetici per l'influenza di un campo magnetico mutino il loro orientamento. Se si prescinde dall'emissione e dall'assorbimento di radiazione, dagli urti e da altri analoghi effetti, gli atomi in un campo magnetico eseguono un moto di precessione (rotazione di Larmor) attorno alla direzione del campo. Se la direzione del campo muta lentamente rispetto alla rapidità del moto di precessione, l'angolo del moto di precessione risulta rimanere inalterato. Un disporsi secondo le inclinazioni prescritte dalla teoria dei quanti (0 e π per l'atomo d'argento nell'esperimento di Stern e Gerlach) non può quindi aver luogo senza influenze esterne del tipo della radiazione o delle collisioni.

§ 3. La spiegazione più immediata del risultato sperimentale

¹Zeitschr. f. Phys. **11**, 31 (1922).

²Zeitschr. f. Phys. **9**, 349 (1922).

appare a prima vista essere che l'orientamento dell'atomo deriva dal suo ingresso nel campo dell'elettromagnete, e in particolare per scambio di energia. E' necessaria non solo una cessione di energia, ma anche un'assunzione dal campo di radiazione, quest'ultima per gli atomi che si dispongono antiparallelemente alle linee di forza. Come rapidamente avviene il cambiamento del momento dell'atomo sotto l'influenza della radiazione (a temperatura ambiente)? - lo si può certo valutare in proporzione al tempo richiesto per il verificarsi delle transizioni da uno stato quantico all'altro. Sappiamo d'altra parte che in casi di questo tipo per la transizione di una serie di atomi questo tempo coincide ogni volta (per lo meno come ordine di grandezza) con quello del modello classico corrispondente. Nel nostro caso di un atomo dotato di momento magnetico che precede esso sarebbe quello di un dipolo magnetico che irraggia durante la sua rotazione conica. Il tempo del riorientamento sarebbe (con un'intensità di campo di 10000 Gauss) dell'ordine di 10^{11} sec., nel caso che fosse operante solo il decadimento radiativo del moto di precessione. Ma se si tiene conto dell'influenza della radiazione termica circostante ["irraggiamento positivo e negativo"³] esso si accorcia a circa 10^9 sec.

Questi sono quindi senz'altro tempi di un ordine di grandezza con il quale non si ha affatto a che fare nell'esperimento, poichè il riorientamento deve avvenire in un tempo inferiore di 10^{-4} sec.

§ 4. Per cercare di venir fuori da questa difficoltà si prospettano due ipotesi alternative:

A. Il vero meccanismo è tale che l'atomo non si può mai trovare in uno stato nel quale non sia completamente quantizzato.

B. Per azioni rapide risultano stati che infrangono la regola quantica relativa all'orientazione; le giaciture richieste dalla regola quantica si ripristinano mediante emissione e assorbimento di radiazione, e con una velocità di reazione di gran lunga maggiore che per le transizioni da uno stato quantico all'altro.

Una scelta a priori tra queste due alternative appare allo

³vedi A: Einstein, Zur Quantentheorie der Strahlung. Phys. Zeitschr. **18**, 121 (1917), § 2.

stato attuale impossibile, ma è opportuno porre chiaramente in evidenza la fondamentale differenza tra di esse e le difficoltà caratteristiche che ciascuna di esse comporta.

§ 5. Discussione dell'alternativa A. 1. Che cosa essa comporti, lo si esemplifica particolarmente bene con l'esperimento di Stern e Gerlach: nella regione del vapore del fornetto di fusione ogni atomo d'argento immediatamente dopo ogni collisione è completamente quantizzato, e quindi il suo asse magnetico è orientato dal campo magnetico che sussiste in quella posizione, per quanto debole sia. Dall'ultima collisione durante il suo volo attraverso le diverse regioni del campo la sua orientazione rimane costantemente allineata alla direzione del campo nella posizione di cui sopra⁴.

2. Di conseguenza una parte dei momenti (quantizzati) sarà parallela, un'altra antiparallela al campo, e la distribuzione statistica sarà governata dalla temperatura e dall'intensità del campo nella regione del vapore del fornetto e nient'affatto dalla temperatura (di radiazione) e dall'intensità del campo nello spazio attraversato in seguito!

3. Uno dovrebbe decidersi pertanto ad assumere quanto segue: campi anche deboli devono immediatamente dopo la collisione (cioè l'azione di campi assai più forti) essere determinanti per l'orientamento. Per variazioni della direzione del campo magnetico che siano a piacimento rapide rispetto alla rotazione di Larmor l'asse magnetico dell'atomo dovrebbe seguire completamente la direzione del campo come per variazioni lente a piacere. Più in generale: Per variazioni arbitrariamente rapide delle condizioni esterne un sistema meccanico dovrebbe disporsi in quello stesso stato finale, che si verifica con l'esecuzione arbitrariamente lenta (adiabatica) della variazione delle condizioni esterne. Che ciò comporti una violazione delle leggi meccaniche, lo si può facilmente rendere evidente con esempi⁵.

⁴ *Il Dr. G. Breit ha avanzato una simile ipotesi durante una discussione in un colloquio di fisica a Leida.*

⁵ *Un esempio in qualche misura fittizio: un accorciamento adiabatico della lunghezza del filo di un pendolo muta*

§ 6. Presentazione dell'alternativa B. 1. Per l'esperimento di Stern-Gerlach si darebbe la seguente descrizione: nella regione del vapore del fornetto immediatamente dopo ogni urto l'asse magnetico di un atomo è diretto a caso rispetto al campo debole che si ha in quella posizione. L'orientazione avviene mediante radiazione infrarossa, più precisamente mediante decadimento radiativo e mediante irraggiamento positivo e negativo, con una orientazione parallela e antiparallela rispetto al campo. Per questo è essenziale l'ipotesi che a transizioni di questo tipo da stati non quantici a stati quantici corrispondano probabilità di transizione di un ordine di grandezza assai più alto⁶ che per transizioni tra uno stato quantico ed un altro. Dopo l'ultimo urto durante il volo attraverso le diverse parti del campo l'orientazione dell'asse si aggiusta in modo quasi adiabatico alla direzione del campo che muta, e i difetti angolari assai piccoli di volta in volta introdotti sono compensati mediante uno scambio radiativo estremamente debole di frequenza assai infrarossa (assai più infrarossa della frequenza di precessione).

2. La suddivisione statistica tra orientazione parallela e antiparallela al campo sarebbe anche in questo caso determinata essenzialmente dalla temperatura e dall'intensità di campo nel

notoriamente la frequenza ν e l'energia ϵ allo stesso modo, cosicchè la regola quantica rimane soddisfatta. Ma se si accorcia la lunghezza del filo rapidamente, per esempio quand'è nella posizione verticale, ν sarà più grande, mentre secondo la meccanica non sarà scambiata energia. L'alternativa A richiede quindi uno scambio di lavoro meccanicamente incomprensibile.

Secondo esempio: un atomo magnetico in un campo magnetico debole. In una rotazione infinitamente lenta del campo (infinitamente lenta rispetto alla velocità di precessione) secondo le leggi della meccanica l'asse magnetico dell'atomo segue la direzione del campo. Se ciò avvenisse anche per una variazione rapida della direzione del campo si presenterebbe una variazione del momento angolare meccanicamente incomprensibile.

⁶corrispondente ad un tempo di decadimento di 10^{-4} invece che 10^9 sec.

fornetto di fusione!

3. Secondo l'alternativa B un vapore monoatomico i cui atomi possiedono momento magnetico, in un campo magnetico emetterebbe o assorbirebbe sul lato a lunghezza d'onda lunga rispetto alla frequenza del moto di precessione; quindi per campi opportuni nella regione delle onde elettriche.

4. E' caratteristico dell'alternativa B che essa rende l'aggiustamento in uno stato quantico dipendente dalla possibilità di irraggiamento e decadimento radiativo. Essa compie quindi una distinzione fondamentale tra sistemi puramente meccanici e sistemi capaci di irraggiare. Per esempio l'asse di rotazione di una trottola simmetrica pesante potrebbe solo allora raggiungere orientazione quantica rispetto al campo di gravità, quando fosse dotata di appropriate cariche elettriche. Se si volesse estendere l'ipotesi B dallo stabilirsi in un'orientazione allo stabilirsi in generale in uno stato quantico, cioè quindi per esempio se anche le oscillazioni di un reticolo cristallino o le rotazioni di una molecola ammettessero uno stabilirsi spontaneo su stati quantici solo nel caso di opportune cariche elettriche, si giungerebbe ad un'evidente contraddizione con le esperienze relative ai calori specifici, per esempio del diamante e dell' H_2 gassoso.

§ 7. Le difficoltà enumerate mostrano quanto insoddisfacenti siano entrambi i tentativi di interpretazione qui esposti dei risultati trovati da Stern e Gerlach. Non si è parlato dell'ipotesi di Bohr - che in campi complicati in generale non esista alcuna quantizzazione netta.

Leida-Berlino, maggio-giugno 1922.