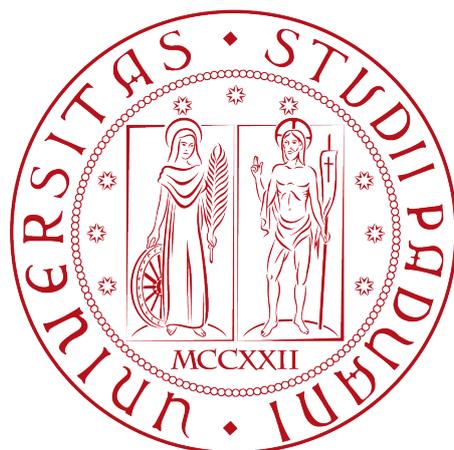


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI FISICA ED ASTRONOMIA

CORSO DI LAUREA IN FISICA

**DALLA TEORIA DEI QUANTI ALLA MECCANICA QUANTISTICA:**

ORIZZONTI, METODI E RUOLI NUOVI IN UNA SOCIETÀ IN TRASFORMAZIONE

Laureando: BATTAINI FEDERICO

Relatore: PERUZZI GIULIO

Anno accademico 2013/2014



*Il militarismo e la scienza sono i due solidi pilastri della Grösse Deutchlands la cui  
cura non deve mai cessare*

Adolf von Harnack, teologo e presidente della Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft, nel 1920

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Termodinamica e vecchia teoria dei quanti</b>	<b>3</b>
2.1	Planck ed Einstein i primi contributi alla teoria dei quanti. . . . .	6
2.2	Sviluppi ulteriori . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Istituzioni scientifiche ed economia</b>	<b>13</b>
3.1	Fino alla prima guerra mondiale . . . . .	13
3.2	Linee di sviluppo economico nel primo dopoguerra in Germania . . . . .	14
3.3	Lo sviluppo delle istituzioni scientifiche . . . . .	18
<b>4</b>	<b>La definizione della Meccanica Quantistica</b>	<b>23</b>
4.1	Il programma di Bohr . . . . .	23
4.1.1	Impostazioni nuove e problemi diversi . . . . .	25
4.1.2	Il principio di corrispondenza . . . . .	27
4.2	Probabilità e corrispondenza fino alla Meccanica delle Matrici . . . . .	29
<b>5</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>35</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>36</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>37</b>



# 1 Introduzione

*Per la scienza moderna non c'è più all'origine l'oggetto materiale, ma la forma, la simmetria matematica. E siccome la struttura matematica rappresenta in ultima analisi un contenuto spirituale, si potrebbe dire anche con le parole del Faust di Goethe: "All'inizio era il logos."*

Werner Heisenberg<sup>1</sup>

Seguire gli sviluppi della fisica teorica - nello specifico della definizione della Meccanica Quantistica - a cavallo della prima guerra mondiale mi ha spinto ad abbracciare con un unico sguardo quasi trent'anni di storia della fisica densissimi di trasformazioni, adattamenti e risultati oltre che gravati del peso di una storia ricca di avvenimenti, di sconvolgimenti sociali, di guerra e di asprissimo conflitto fra classi.

Ci si pone dinnanzi uno spettro molto ampio di dinamiche economiche, politiche e sociali fortemente allacciate alle forme e alla prassi della comunità scientifica europea e statunitense, che vede, in questi anni, la Germania come laboratorio scientifico oltre che sociale e politico. La repubblica di Weimar e le contraddittorie tensioni da cui fu attraversata rappresentano a mio avviso un crogiolo, ricco di brandelli di futuro, la cui ricostruzione che ne colga tutti gli aspetti salienti è, per quanto ne so, ancora da farsi. Ottimi spunti per cogliere le dinamiche di "quel tempo" li ho avuti da una raccolta di testi di Ernst Bloch, dal titolo "Eredità del nostro tempo" che non comparirà nella bibliografia per la sua alterità e per la mia incapacità a farne buon uso, ma che merita di essere qui ricordata per la sua possibile utilità.

La composizione della comunità scientifica, la sua attenzione a certi problemi e la sua disposizione ad accettare determinate teorie e non altre, andrebbe analizzata in dettaglio per comprendere al meglio quelle trasformazioni nello sviluppo della scienza che non sempre sono imputabili alla pura aderenza a risultati scientifici.

Questa opera di ricostruzione non è qui per nulla completa ed è debitrice di lavori molto più ricchi, coerenti e chiari, che pure non esauriscono l'argomento. Quello che segue è quindi l'inizio di un lavoro di approfondimento anche e soprattutto personale.

---

<sup>1</sup>In Heisenberg et al. (1959) pag. 20

## *1 Introduzione*

La struttura del testo è piuttosto semplice, in una prima parte mi occuperò delle trasformazioni scientifiche a cavallo del cambio di secolo e l'emergere della "vecchia" teoria dei quanti, successivamente cercherò di ricostruire in forma di schizzo i tratti dell'economia e delle politiche della scienza in Germania fino ai tardi anni '20 e per concludere presenterò lo sviluppo di una impostazione scientifica che dalle intuizioni di Bohr arriverà al fiorire della Meccanica Quantistica, lungo cerniere che lo stesso Bohr aveva delineato.

## 2 Termodinamica e vecchia teoria dei quanti

Tra la fine del XIX secolo e l'inizio del XX si diedero a livello europeo e globale alcune profonde trasformazioni, dalla cosiddetta prima ondata di globalizzazione e il contemporaneo rafforzamento degli stati nazionali, dallo sviluppo di formidabili imprese tecnologiche e l'affermarsi di una prassi scientifica e di scoperte decisamente nuove e tutto ciò a guisa di una profonda ristrutturazione delle forme della produzione. In particolare la lunga corsa per lo sviluppo del capitalismo tedesco, iniziata già a cavallo della metà del secolo, raggiunge in questi anni il suo pieno potenziale: la chimica, ancor più quella organica, è l'avanguardia di questo sviluppo che da più parti è stato descritto come impetuoso. Per dare l'idea di questo sviluppo basta riportare alcuni dati: la produzione di coloranti in Germania passa dagli 1,2 milioni di sterline del 1874 ai 6 milioni nel 1898, mentre nello stesso periodo si inverte completamente il rapporto fra importazioni ed esportazioni di alcali che al 1900 vede le importazioni praticamente ridotte a zero; nel periodo 1872-1913 la produzione chimica segna un tasso di crescita annuale del 6,2%. (Baracca et al., 1979, pag 128 e seguenti)

Molti settori cruciali della fisica sorsero dalla dinamica dell'innovazione tecnologica in chimica. Il problema dell'energia elettromagnetica radiante e della radiazione di corpo nero - che saranno alla base dello sviluppo della teoria dei quanti - derivano direttamente dalla metodologia spettroscopica di analisi chimica introdotta da Bunsen e Kirchhoff nel 1860, oltre che dai tentativi di quest'ultimo di descrivere il potere radiante dei corpi caldi. Lo studio delle proprietà termodinamiche dei sistemi fisici alle alte temperature e pressioni fu incoraggiata dalla scoperta e dall'utilizzo su scala industriale di reazioni chimiche complesse - come la sintesi dell'ammoniaca o del colorante indaco - che non avvengono a condizioni ordinarie. Il problema della catalisi stimolò la produzione di nuove leghe ed una migliore comprensione della metallurgia, mentre i problemi legati alla liquefazione dei gas e alla distillazione frazionata dell'aria (per ottenere ossigeno e azoto economici per l'industria chimica), stimolarono lo sviluppo della fisica delle basse temperature. (Baracca, 2005b)

Queste trasformazioni economiche non pongono solo domande nuove alla scienza, ma le conferiscono un ruolo nuovo. La chimica in particolare occupa ora una posizione sempre più attiva nella produzione, motivo per cui in Germania si realizza una forte integrazione tra *Technische Hochschulen*, Università e industria<sup>1</sup>; contemporaneamente allo sviluppo di attrezzatissimi laboratori chimici all'interno delle industrie stesse. Tra i maggiori chimici dell'epoca pochi sono quelli che non hanno lavorato alle dirette dipendenze o su progetti in laboratori finanziati dalle grandi industrie chimiche: per fare alcuni esempi K. Graebe e K. Liebermann sintetizzarono il primo colorante naturale, l'alizarina, nel laboratorio del chimico Baeyer al Politecnico di Berlino e si rivolsero poi a H. Caro che mise a punto un processo utilizzabile industrialmente per la BASF. Per la BASF lavorarono anche lo stesso Baeyer per la sintesi dell'Indaco e ancora C. Bosch e F. Haber per la sintesi industriale dell'ammoniaca, dove si posero anche i problemi della produzione di catalizzatori più efficaci e durevoli e della distillazione dell'aria a cui si è accennato prima.

L'accelerazione che si instaura a fine secolo mette in discussione le prassi e lo statuto dell'impostazione riduzionistica di cui Maxwell e Boltzmann erano stati vessilliferi. Entra soprattutto in crisi il paradigma meccanicistico che, come strumento interpretativo della realtà e della correttezza dei risultati scientifici, ha dominato per tutta la seconda metà del secolo la fisica e anche la ricerca scientifica in generale.

Si scontrarono a questo punto tre impostazioni scientifiche alternative, portatrici di ideali conoscitivi e pratici profondamente diversi che schematizzeremo<sup>2</sup> in :

- la fisica teorica, modellistica e riduzionistica: Maxwell e Boltzmann ne sono tra i più importanti protagonisti
- fenomenisti, energetisti ed empiriocriticisti: Ostwald e Mach ad esempio
- una prassi e concezione anti-riduzionistica, che si sviluppa a partire dalla termodinamica e del suo utilizzo “spregiudicato” dagli ambienti della ricerca chimico-fisica principalmente tedeschi.

Facciamo ora una brevissima carrellata sulle prime due posizioni lasciando alla prossima sezione l'esplorazione della posizione della nuova fisica teorica che porterà alla teoria dei

---

<sup>1</sup>Di questo diremo più ampiamente nel prossimo capitolo

<sup>2</sup>Questa operazione evidentemente non può rispecchiare la varietà e le sfumature delle posizioni assunte dai singoli scienziati che anzi osservati in dettaglio e da un punto di vista della consapevolezza soggettiva mostrano uno spettro assai vario e spesso contraddittorio. Mi limito a riportare ciò che è stato messo in luce come posizione oggettiva, ovvero che prende in considerazione prima di tutto il contributo concreto alla definizione delle pratiche e alla scelta delle problematiche, da Ciccotti e Donini (1976) e da Baracca, Ruffo e Russo (1979).

quanti dalla quale prenderà avvio con elementi continuità e ancora una volta di rottura la Meccanica Quantistica.

La posizione che raccolse energetisti ed empiriocriticisti vede nella crisi del meccanicismo lo spazio per ribadire il programma positivista di ricondurre l'attività scientifica a classificazione dei dati dell'esperienza sensibile. Il programma machiano, che ha ne "La meccanica nel suo sviluppo storico-critico" il caposaldo, è bensì molto più articolato, ma ha sicuramente come linee guida l'eliminazione delle immagini metafisiche e l'economicità ed eleganza delle teorie induttive che la scienza dovrebbe ricercare. Mach mette a critica, collocandolo sul piano storico, il ruolo che la meccanica ha nelle teorie fisiche. L'intelletto e la ricerca scientifica organizzata poi hanno il compito di trovare le relazioni tra i fenomeni che il flusso sensoriale gli conduce e in questa impostazione chiaramente perdono di senso la ricerca di un fondamento unitario, tanto più meccanico, di fenomeni che vengono allo sperimentatore in domini esperienziali completamente differenti e allo stesso tempo non ha senso considerare come portatori di una qualche realtà propria i modelli, che sono tutt'al più utili strumenti formali. Così la teoria atomica o l'analogia tra propagazione di onde in un fluido e la propagazione delle onde elettromagnetiche in un etere dalle caratteristiche molto meccaniche se non addirittura macchiniche (come nella rappresentazione a pulegge di Maxwell) perdono significato, diventando raffigurazioni metafisica di un mondo. Su questo terreno si inseriscono gli energetisti come Ostwald che si rifanno alla termodinamica come fondamento di una costruzione scientifica basata sui fenomeni e svincolata da modelli specifici. Contro questa posizione che appare, sebbene per un periodo dominante, incapace di produrre i risultati scientifici adatti alla velocità con cui i problemi entrano nel dominio dei ricercatori, si battono scienziati come Boltzmann che hanno ben presente la necessità e la fecondità di ipotesi e modelli, ma che rimangono legati ad un'impostazione meccanicistica o al meglio riduzionistica<sup>3</sup>.

Da queste due impostazioni emergerà *vincente* una "terza posizione" che si fa strada fra le prime due superando i limiti e le inadeguatezze di entrambe ai nuovi ritmi, che la seconda rivoluzione industriale ha portato nello sviluppo di risultati sperimentali e nella richiesta di soluzioni originali a problemi che potrebbero sembrare più marginali. È questa la nuova fisica teorica di cui Planck può essere considerato - più per il suo contributo effettivo che per le sue convinzioni - il capostipite Ciccotti e Donini (1976). "la termodinamica si trasforma invece nel presupposto generale per il controllo dei fenomeni: non già [...] surrogato di modelli specifici, ma al contrario contesto al tempo stesso più

---

<sup>3</sup>Cioè se non punta ad una riduzione di tutta la fisica alle interazioni meccaniche, cerca di sostituire a queste un altro tipo di interazione, come la teoria degli elettroni di Lorentz che riduce fondamentalmente ogni fenomeno fisico all'elettromagnetismo.

sicuro e meno limitativo nel quale avere mano libera nella ricerca delle soluzioni più spregiudicate” (Baracca et al., 1979, pag 160).

## 2.1 Planck ed Einstein i primi contributi alla teoria dei quanti.

Se Boltzmann già nel 1872 aveva trattato matematicamente l’energia come somma di un numero finito di unità multiple di una  $\varepsilon$  - purché a termine del calcolo questa potesse essere mandata a zero - ciò che caratterizza il nuovo approccio di Plack è l’ignorare il problema interpretativo. Planck è quasi unanimemente, soprattutto a livello divulgativo, descritto come il primo ad aver introdotto l’ipotesi quantistica. Questa tesi perde solidità se si tengono a mente almeno tre elementi: già Boltzmann aveva utilizzato un metodo di calcolo statistico “quantizzato” che è poi diventato di corrente utilizzo fra i fisici impegnati nello studio della meccanica statistica. Bisogna poi ricordare che la prima formula corretta per spettro di corpo-nero<sup>4</sup> venne ricavata da Planck attraverso un’interpretazione termodinamica della formula di Wien con una correzione del tutto euristica basata sui risultati sperimentali di Rubens e Kurlbaum<sup>5</sup>. Infine non va dimenticato che l’introduzione del metodo “quantizzato” fu interpretata da Planck stesso come giustificazione della precedente formulazione. Egli rimane senz’altro, e qui sta la sua rilevanza, il primo ad introdurre un approccio non-meccanicistico e ad oltrepassare il problema interpretativo. L’elemento di concreta novità sembra quindi, a mio avviso, risiedere nella prassi innovativa che ha nella termodinamica la guida e non lo strumento di spiegazione dei fenomeni, ovvero un paradigma entro cui verificare la validità generale delle ipotesi e in cui avere un riferimento per le linee di ricerca da approfondire, piuttosto che un tentativo di ridurre ad espressioni termodinamiche tutta la fisica. Baracca, Livi e Russo individuano in questa prassi e nei suoi passi ulteriori a partire dai risultati di Einstein del 1905

“una concezione generale e un programma di ricerca ulteriore che puntano alla costruzione di una nuova immagine del mondo fisico fondata su una teoria matematica formale, ma tuttavia saldamente ancorata ad una descrizione in termini evolutivi dei fenomeni in tutti i dettagli, fondata su idee e concetti

---

<sup>4</sup>Che Planck ricava nel primo articolo del 1900

<sup>5</sup> Dopo aver ricavato la  $(\frac{\partial^2 s}{\partial \varepsilon^2})^{-1} = -a\varepsilon$ , che fornisce in variabili termodinamiche - entropia ed energia - la formula di Wien, Plack arrivò alla  $(\frac{\partial^2 s}{\partial \varepsilon^2})^{-1} = -a(\varepsilon^2 + \gamma\varepsilon)$  tenendo in considerazione i recentissimi risultati sperimentali che davano l’intensità della componente a bassa frequenza dello spettro crescere linearmente con la temperatura. (Baracca, Baracca (2005a))

concretamente, “tangibilmente” fisici [...]” (pag. 17 Baracca et al. (1979 e 1980))

Quello che si delinea è un uso della termodinamica come base e guida metodologica che supera d’un balzo i problemi interpretativi e la necessità di includere i risultati all’interno di una visione unitaria e complessiva della natura, meccanica o elettrodinamica che fosse. Le nuove idee fioriscono accettando un approccio anti-meccanicistico e anti-riduzionista<sup>6</sup> i cui frutti confermano a posteriori la bontà. I nuovi principi vengono estratti dai dati fenomenologici selezionando ed elevando a principi fondamentali alcune proprietà generali. Spesso gli stessi grandi problemi, provenienti da nuovi risultati sperimentali, su cui si interrogavano problematicamente i fisici, sono stati capovolti e semplicemente assunti come principi di validità generale, purché confermati da prove sperimentali complessive. Ciò che semplicemente salta è l’accordo con le strutture teoriche tradizionali che è ora considerato non più necessario. (Baracca, 2005b)

Dovendo riassumere in pochi paragrafi lo sviluppo della “vecchia” teoria dei quanti mi limiterò a citare i contributi più significativi, voglio però sottolineare come essi fossero sostenuti da un dibattito più ampio e da una serie numerosissima di fisici meno noti che in questi anni principalmente in Germania contribuirono all’affermarsi di questa prassi scientifica.

Einstein aveva iniziato almeno dal 1902 lo sviluppo di un programma di ricerca ampiamente collocato nella prassi che abbiamo descritto a “guida termodinamica”. Qui si collocano i suoi lavori in questi anni, concentrati nella ricerca di una connessione fra gli aspetti macroscopici e microscopici della materia con la formulazione indipendente della meccanica statistica equivalente a quella dello statunitense Gibbs e che prosegue nel 1905 con gli articoli sul moto Browniano e l’articolo sul campo di radiazione in cui compare per la prima volta il quanto come entità fisica<sup>7</sup>. Molti studiosi di storia della scienza concordano nel riconoscere l’originalità del lavoro di Einstein che non cita mai, nell’articolo “Un punto di vista euristico relativo alla generazione e trasmissione della luce”, i risultati di Planck per lo spettro del corpo-nero. Conferma di questo è un passaggio in un articolo dell’anno seguente

“[L’anno passato] mi sembrava che la teoria di Planck sulla radiazione fosse da un certo punto di vista in contrasto con il mio lavoro. Ad ogni modo,

---

<sup>6</sup>Anche se Planck si muove proprio alla ricerca di un fondamento elettromagnetico del secondo principio della termodinamica si adeguerà ai risultati che si può dire gli sfuggono di mano

<sup>7</sup>A questi va di certo aggiunto il famosissimo articolo “Sull’elettrodinamica dei corpi in movimento” che segna la nascita della relatività ristretta. È stato mostrato da S. Bergia e G. Battimelli come questo studio, che terremo fuori dalla nostra esposizione, sia parte integrante del programma “termodinamico” di Einstein.

nuove considerazioni [...] mi hanno provato come i fondamenti teorici su cui si basa la teoria di Planck divergono dai principi che risulterebbero dalla teoria di Maxwell e dalla teoria degli elettroni, e se ne allontana dal momento in cui Planck fa un uso *implicito* dell'ipotesi dei quanti di luce" (Einstein, 1906 in Baracca (2005a))

A tal proposito scrive A. Baracca "L'indipendenza e la convergenza finale delle linee di pensiero di Planck ed Einstein [...] confermano la nostra interpretazione, che all'inizio del XX secolo un profondo rinnovamento metodologico e operativo della prassi scientifica fu introdotto nella fisica [...]"(Baracca, 2005a)

Quello che è solitamente descritto come l'articolo in cui viene introdotta una spiegazione per l'effetto fotoelettrico parte in realtà da considerazioni del tutto generali: "Esiste una differenza formale di grande importanza tra i concetti teorici che i fisici hanno prodotto rispetto ai gas e gli altri corpi ponderabili, e la teoria di Maxwell dei processi elettromagnetici nel cosiddetto vuoto. [...]" in cui l'energia di soglia nell'effetto fotoelettrico non è altro che un effetto precisamente predetto. A partire da queste costatazioni che ci riportano all'idea della una rottura metodologica è stato sottolineato(Baracca, 2005a) come questo articolo rappresenti l'introduzione del quanto come entità fisica.

È in questi anni che si consolida la prassi introdotta da Planck e Einstein a partire dalla convergenza delle ricerche, su di un terzo principio della termodinamica che consenta di ricavare in forma univoca le costanti di equilibrio delle reazioni chimiche, condotte da Nernst tra il 1906 e 1907 con i lavori di Einstein del 1907 sul calore specifico dei solidi a basse temperature. Molte sono anche le conferme sperimentali che accreditano la teoria quantistica con sempre più forza, tant'è che già nel 1911 al primo congresso Solvay, Jeans e Rayleigh, rimangono soli a sostenere il vecchio approccio classico, che non riesce a darsi ragione della cosiddetta catastrofe ultravioletta. Nel 1915 arriva la conferma dell'effetto fotoelettrico e la misura di  $h$  da parte di Millikan, mentre tra gli anni '22 e '25 con gli esperimenti di Compton, Bothe e Geiger e nuovamente Compton con Simon<sup>8</sup> trova piena conferma la direzionalità del fotone che consolida in maniera definitiva la sua ipotesi.

Planck, Einstein e Nernst proseguono le loro linee di ricerca con sovrapposizioni, ipotesi anche in contrasto rispetto alle posizioni precedenti, ma quasi esclusivamente all'interno delle pratiche e idee che ho provato a delineare prima: il primo prova nel 1912 ad "allentare" l'ipotesi quantica con il *secondo postulato quantico*<sup>9</sup>, poco dopo si interessa

---

<sup>8</sup>Entrambi gli esperimenti del '25 eseguiti per confutare la teoria BKS di cui diremo nel terzo capitolo

<sup>9</sup>Planck suppone che l'assorbimento di radiazione sia un processo continuo mentre l'emissione sia possibile solo per multipli di  $h\nu$

al teorema di Nernst è sua infatti la formulazione di quest'ultimo in termini dell'uguaglianza dell'entropia dei sistemi allo zero assoluto; mentre Einstein pubblica nel 1913 con Stern un lavoro in cui mostra come assumendo un'energia di punto zero si possa ricavare la forma di Planck per il corpo-nero senza utilizzare nessun concetto quantistico<sup>10</sup>. Se Einstein rifiuta poi questo suo lavoro, Nernst lo recupera e nel 1916 sviluppa l'idea che l'energia fluttuante di punto zero sia in realtà responsabile delle proprietà quantistiche.(Baracca et al., 1979 e 1980, pag. 19 e seguenti)

## 2.2 **Sviluppi ulteriori**

Parallelamente a quanto abbiamo descritto, sulla stessa prassi scientifica proseguono altri campi di indagine. Di particolare rilievo è quello che si snoda attorno alla revisione dei concetti della meccanica statistica, in particolare nel tentativo di costruire una teoria dei gas quantistici, molecolari o più in generale delle fluttuazioni. Sono molti i contributi che si susseguono da Ehrenfest e Debye fino alla statistica di Einstein e Bose nel 1924.

A partire dal lavoro di Einstein del 1909 in cui evidenziava la compresenza di un termine corpuscolare e di uno ondulatorio nelle *fluttuazioni del campo di radiazione* (una ricerca legata al campo di indagine accennato appena sopra) si svilupperanno i concetti e gli strumenti formali riguardo il “dualismo onda-particella”. Formulazione che sboccherà nella meccanica ondulatoria di Schrödinger.

De Broglie introdusse nella sua tesi di dottorato del 1924 l'ipotesi fondamentale di associare ad ogni particella materiale un processo oscillatorio tramite l'equazione dell'energia in senso relativistico  $mc^2 = E = h\nu$  e ricava la regola di quantizzazione per il momento angolare partendo dalla  $p = \hbar k = h/\lambda$ . A questa ipotesi era giunto sulla scorta di considerazioni di due ordini. Da un lato l'ipotesi di Bohr sulla quantizzazione delle orbite elettroniche stabili e quindi “la comparsa di numeri interi nei problemi di micro-meccanica” che tanto ricordano quelli che appaiono nella “teoria delle onde nel calcolo dei fenomeni di interferenza e risonanza” cosa che gli ha suggerito che per gli elettroni e gli altri corpuscoli materiali esista una dualità onda-corpuscolo come per i fotoni con la radiazione elettromagnetica. D'altro canto è la sua conoscenza e apprezzamento della relatività ristretta Einsteiniana che lo guida tramite analogia(Besana, 1976):

prendiamo un'equazione che descrive un fenomeno ondulatorio

$$S = A \sin\left[2\pi\nu\left(t - \frac{x}{u}\right) + \epsilon\right]$$

<sup>10</sup>Idea che verrà ripresa parecchi decenni più avanti e di cui diremo nel terzo capitolo

## 2 Termodinamica e vecchia teoria dei quanti

dove  $t$  è il tempo,  $u$  la velocità di propagazione dell'onda; ora prendiamo invece le trasformazioni di Lorentz per il tempo e la frequenza

$$t' = \beta(t - \frac{v}{c^2}x)$$

e  $\beta v' = v$  e l'equazione di un fenomeno oscillatorio in un punto

$$S = A \sin(2\pi\nu t)$$

che se il punto è in moto rispetto all'osservatore diviene inserendo le precedenti espressioni

$$S = A \sin(2\pi\nu' t') = A \sin[2\pi\nu(t - \frac{x}{u})]$$

che è proprio la formula ricavata per un fenomeno ondulatorio, questo ha consentito a De Broglie di considerare un processo periodico solidale con un corpo in movimento come un processo ondulatorio con velocità di propagazione

$$u = \frac{c^2}{v}$$

che sembrerebbe violare i dettati della relatività ristretta. Per ciò De Broglie si rifà al concetto di *velocità di gruppo* ovvero la velocità con cui si propaga il *centro d'energia* di un gruppo di onde con frequenza vicina che può rappresentare la localizzazione dell'aspetto corpuscolare. Arriva a mostrare che essa è proprio uguale alla  $v$  velocità del corpuscolo. (Besana, 1976)

Nel seguito del lavoro, come abbiamo accennato prima, il fisico francese affronta la regola di quantizzazione delle orbite del modello di Bohr:

[la regola] è stata ottenuta come conseguenza necessaria della teoria delle onde materiali; fa parte di un discorso teorico coerente, ha acquistato un preciso significato, è stata in una parola, "spiegata". (Besana, 1976, pag 374)

In una parte successiva viene affronta anche la quantificazione dell'energia di traslazione di un gas contenuto all'interno di un recipiente chiuso. Si evidenzia anche per De Broglie l'interesse verso la ridefinizione dei concetti della meccanica statistica e della termodinamica, che è un tratto distintivo dei fisici che abbiamo collocato nel filone di ricerca che stiamo seguendo nel suo sviluppo.

È proprio Einstein a riprendere per primo queste idee in un lavoro del 1925 sulle fluttuazioni di un gas quantistico corpuscolare per il quale verifica ancora la compresenza

di un termine ondulatorio e di uno corpuscolare. La teoria di De Broglie è per Einstein il punto di partenza per la ricerca di un *fondamento fisico* alla analogia fra la radiazione di corpo nero e la sua teoria sul comportamento di un gas a bassa temperatura (Baracca et al., 1979 e 1980, pag 23). Da questa attenzione di Einstein, Schrödinger viene stimolato alle idee di De Broglie come sottolinea in una lettera al primo nel 1926

“[...] l'intera faccenda non sarebbe ancora stata sviluppata (non da me intendendo), e forse non lo sarebbe stata mai, se l'importanza delle idee di De Broglie non fosse stata posta giusto sotto il mio naso dal vostro secondo lavoro sulla degenerazione nei gas” (Schrödinger in Forman e Raman, 1969, in (Baracca et al., 1979 e 1980))

[...] le concezioni ondulatorie nascono e si sviluppano soprattutto ad opera di scienziati direttamente coinvolti nel tentativo di formulare una meccanica statistica quantica e legati quindi agli sviluppi della prassi scientifica che nella nostra interpretazione risale in ultima istanza alle prime teorie dei quanti. (Baracca, Livi e Ruffo, 1979 e 1980, pag 24) Schrödinger con l'evidente intento di fornire una *spiegazione* delle regole di quantizzazione scrive i quattro articoli in cui prova a disegnare un quadro unitario della fisica microscopica in cui le regole di quantizzazione sono giustificate come risultato delle proprietà delle onde a cui assegna una realtà molto concreta interpretando la  $q = e\psi\psi^*$  come densità di carica elettrica. A evidenza di questo approccio mi sembrano molto indicative le parole con cui si apre la prima memoria del 1926:

In questo articolo vorrei mostrare, in primo luogo per il caso più semplice dell'atomo di idrogeno (non relativistico ed imperturbato), che l'usuale regola di quantizzazione può essere sostituita da un'altra condizione in cui non si fa più alcuna menzione di “interi”. La proprietà integrale segue piuttosto, nello stesso modo naturale in cui, diciamo, il numero di nodi di una corda vibrante deve essere intero. La nuova interpretazione può venire generalizzata e, io credo, colpisce molto a fondo nella vera natura delle regole di quantizzazione. [...] (Schrödinger citato in Baracca et al. (1979 e 1980))

Rimane da ricordare che che i lavori di Schrödinger vennero accolti entusiasticamente sia da Planck che da Einstein (Baracca et al., 1979 e 1980):

Ho letto il vostro articolo nel modo in cui un bambino curioso ascolta col fiato sospeso la soluzione di un problema che lo ha tormentato per molto tempo, e sono incantato dalle bellezze che sono evidenti all'occhio, ma devo

studiarlo molto più attentamente e in dettaglio per essere in grado di affermarlo completamente. ( Planck 4 Aprile '26 in una lettera a Schrödinger in Baracca et al. (1979 e 1980))

I risultati ottenuti da Schrödinger<sup>11</sup> verranno utilizzati in breve tempo dalla cosiddetta scuola "ortodossa", in particolare con l'interpretazione probabilistica che Born darà della funzione d'onda  $\psi$ , ma a questo arriveremo nei prossimi capitoli.

---

<sup>11</sup>Peraltro egli stesso dimostra l'equivalenza formale della sua meccanica ondulatoria con la trattazione di Heisenberg, nel tentativo, esattamente opposto a ciò che si verificherà, di reinglobare quest'ultima nell'impostazione che abbiamo trattato in questo primo capitolo.

## **3 Istituzioni scientifiche ed istruzione, tra scienza, industria e guerra.**

Nel primo capitolo abbiamo accennato agli sviluppi del capitalismo tedesco che portarono dati, esperienze e capacità tecniche che diedero spazio ad un certo sviluppo della scienza e consentirono all'industria di svilupparsi con nuove forze tecnico-scientifiche. Vediamo in questo capitolo come cambia durante la prima guerra mondiale questa situazione e come si sono trasformate le istituzioni scientifiche in Germania.

### **3.1 Fino alla prima guerra mondiale**

L'unificazione degli stati tedeschi sotto la guida della Prussia coincide con lo sviluppo dell'industria tedesca di cui abbiamo fornito qualche dato nel primo capitolo.

Questa crescita operò cambiamenti profondi anche sull'insieme delle idee e degli approcci dominanti in seno alla società tedesca. Le istituzioni universitarie si erano sviluppate per tutta la prima parte del XIX secolo secondo le linee guida idealiste del riformatore dell'accademia tedesca Humboldt (Maffei, 1980, V capitolo), ma nel periodo accennato queste impostazioni entrano in contraddizione con le profonde trasformazioni in atto che non riescono ad essere inglobate in quello schema, si evidenziano scontri e accelerazioni a più livelli. Il primo vede gli intellettuali legati alla borghesia industriale, che vogliono valorizzare la concezione pragmatica-utilitarista della scienza, trovare serie resistenze all'interno delle università. Il secondo piano vede gli operatori tecnico-scientifici, che si andavano formando nelle scuole tecniche, create appositamente per le necessità di formazione utili alle imprese, rivendicare una centralità del proprio operato e quindi dare battaglia contro la concezione della scienza separata dall'economia.

Le scienze chimiche, che condussero rapidamente l'industria tedesca a posizioni di primo piano a livello mondiale necessitavano sia di competenze scientifiche di alto livello, sia di un corpo intermedio di operatori tecnici. L'industria è alla ricerca di queste figure professionali e di un clima favorevole alla loro espansione e trova nelle Technische

Hochschule<sup>1</sup> un ambiente molto più fertile, anche perché il personale operante in queste, o lì istruito, vedeva nello sviluppo industriale la crescita del proprio riconoscimento sociale e la naturale dimensione per la propria espressione professionale ed intellettuale. Si assiste ad un processo dialettico in cui necessità dello sviluppo industriale e della tecnologia produttiva si saldano con le aspirazioni sociali di uno strato sociale, sebbene ristretto, in allargamento, che una volta cooptato<sup>2</sup> a queste esigenze si fa portatore anche delle sue istanze ideologiche, rivendicando la centralità della scienza tecnica.

La politica della scienza del Reich, negli anni 1870 e 1880, vede crescere l'unione tra ricerca di base, sviluppo tecnologico e utilizzazione economica, tramite un maggiore sostegno finanziario alla ricerca scientifica vicina alla produzione e non solo alla formazione, come, invece, era avvenuto in precedenza. (Maffei, 1980). In una situazione in cui, per il numero crescente di studenti, gli scienziati si trovano schiacciati fra insegnamento e funzioni amministrativo-burocratiche, emerge la necessità di istituzioni autonome di ricerca che razionalizzino e concentrino gli sforzi degli scienziati che disponevano di decrescente tempo per lo sviluppo delle ricerche (Maffei, 1980, pag. 50, 51). Qui si inserisce la nascita del P.T.R.<sup>3</sup>, primo modello degli attuali istituti di ricerca (Maffei, 1980, IX capitolo), nato per sopperire alle mancanze di prodotti tecnologici adatti alla ricerca di base e in cui si effettuava sia ricerca di base che l'esame di prodotti tecnologici.

## 3.2 Linee di sviluppo economico nel primo dopoguerra in Germania

“L'apparato industriale tedesco era uscito stremato dallo sforzo sostenuto durante il conflitto mondiale. Il livello tecnologico si era però alquanto sviluppato durante la guerra e l'organizzazione si era spinta all'interno di ogni fase della produzione, dall'approvvigionamento delle materie prime agli investimenti, alla collocazione di capitale e lavoro mediante l'intervento dello Stato. Gran parte del macchinario però era fortemente logorato, gli edifici industriali erano in pessime condizioni, lo stato di miseria e di disoccupazione dei lavoratori era preoccupante, l'inflazione galoppava.” (Maffei, 1980)

Dopo il tracollo militare il passaggio dalla monarchia alla democrazia parlamentare non fu frutto di un processo “dal basso” bensì di un moto “dall'alto” volto ad anticipare e

---

<sup>1</sup>Le indicheremo in seguito con l'acronimo TH.

<sup>2</sup>Anche con il riconoscimento, finalmente, nel 1901 del titolo di dottore ingegnere per i diplomati nelle TH equipollente a quello rilasciato dalle università.

<sup>3</sup>Istituto fisico tecnico del Reich.

prevenire le possibilità di sviluppo dei moti rivoluzionari comunisti.

La nascita della Repubblica di Weimar fu quindi una risposta contenitiva, che pure dava spazio alle rivendicazioni operaie, ma che era attraversata da contraddizioni mai sanate: “Si trattava in sostanza di un patto costituzionale tra il grosso capitale monopolistico e la socialdemocrazia” (Maffei, 1980, pag. 75)

Le speranze di rivoluzione verranno però definitivamente stroncate solo nel 1923, dopo lunghi anni di violenta repressione diretta e inflazione altissima, da un lato, e cooptazione, differenziazione e gestione coordinata dell'industria dall'altra. Contro le lotte operaie all'interno delle fabbriche e le rivendicazioni politiche più generali che crescevano sulla scorta dell'esempio sovietico e con le speranze (o timori per gli industriali) suscitate dall'arrivo dell'armata rossa alle porte di Varsavia, vennero schierati esercito e corpi paramilitari volontari come i Freikorps<sup>4</sup>.

Se anche nel resto del mondo si guardava alla Germania seguendo con speranza o con paura lo scontro di classe, i governi e i poteri economici delle forze alleate temevano però anche il militarismo della borghesia tedesca ed in questo quadro si inseriscono gli accordi di pace di Versailles. Il modello industriale e formativo tedesco, con la partecipazione di scienziati, ingegneri e tecnici alla produzione, unito alla disciplina dei lavoratori, veniva considerato un modello soprattutto dagli osservatori inglesi. Questi, già prima del conflitto, erano convinti che un tale livello si sarebbe potuto raggiungere nel Regno Unito solo con un grande impegno che doveva continuare dopo la conclusione della guerra e solo se gli accordi di pace avessero sancito condizioni così drastiche dal punto di vista economico da impedire alla Germania di rialzarsi. Tutto ciò si concretizzò con accordi che stabilirono condizioni particolarmente pesanti: venivano sottratte alla Germania gran parte della produzione di carbone, ferro e zinco tramite la cessione di Alsazia e Lorena, e l'obbligo a fornire prodotti chimici e farmaceutici, bestiame, treni e navi mercantili (Maffei, 1980, capitoli III e X).

Le tensioni e le contraddizioni all'interno della repubblica di Weimar non venivano solo dall'aspro conflitto di classe, ma erano presenti anche all'interno della borghesia industriale all'interno della quale si fronteggiavano interessi contrapposti di gruppi monopolisti in concorrenza.

---

<sup>4</sup>I Freikorps organizzazioni paramilitari sostenute da industriali, media ed alta burocrazia statale, dalle vecchie classi aristocratiche e anche dal socialdemocratico ministro della difesa Gustav Noske in chiave anti-comunista, utilizzate nella repressione della Lega Spartachista, tramite l'assassinio di centinaia di militanti ed in particolare di Rosa Luxemburg e Karl Liebknecht, ed anche nella repressione del così detto Soviet di Baviera. Nella brutale opposizione al governo rivoluzionario e comunista dichiarato a Monaco nel '19, i Freikorps vedevano nelle loro fila il giovane Heisenberg che, dopo le esperienze paramilitari e di lavori nelle campagne guidate dal suo insegnante di ginnasio, ricorderà quest'esperienza come una felice estate goliardica. (Cassidy, 1996)

Da un lato possiamo collocare i rappresentanti dell'industria pesante, dall'altro quelli delle industrie chimiche ed elettriche che si scontrarono sul ruolo dello stato e sul rapporto con esso: i primi con il monopolio sulle materie prime e la posizione di dominio nell'economia trovavano vantaggioso un *laissez-faire* che limitasse l'intervento statale ai soli momenti di crisi tramite sovvenzioni e, per contrastare le mobilitazioni dei lavoratori, con gli apparati repressivi<sup>5</sup>; i secondi vedevano invece una relazione strettissima fra il loro sviluppo, il livello di coordinazione e una crescita del livello scientifico e tecnologico. Su questi ultimi punti lo Stato poteva rappresentare il luogo di ricomposizione degli interessi concorrenti delle varie industrie e poteva essere il soggetto istituzionale che si assumesse gli oneri maggiori e più slegati da risposte immediate, necessari negli investimenti in ricerca di base. L'industria "leggera" era ben cosciente dell'importanza dell'impegno statale, come stimolo dell'economia e della necessità di una guida centrale dei processi economici.

Walter Rathenau, presidente dell'AEG<sup>6</sup>, fu l'artefice dell'organizzazione per l'approvvigionamento autonomo delle materie prime durante la guerra e in questo ruolo sviluppò un coordinamento fra le industrie tramite centralizzazione, requisizione e distribuzione alle imprese di guerra delle materie prime. Questo tipo di organizzazione favorì una vasta concentrazione dell'economia che portò alcuni grandi gruppi capitalistici ad una crescita enorme dei profitti. Con il prolungarsi della guerra, questo piano di razionalizzazione del sistema produttivo sarà però sostituito da calcoli puramente bellici, che subordineranno l'intera economia all'industria pesante che potrà tornare a ricoprire un ruolo dominante.

Rathenau nel primo dopoguerra divenne ministro della ricostruzione della neonata Repubblica e grazie ad una convergenza tra le idee del Partito Socialdemocratico e le necessità di rilancio dell'accumulazione su nuove basi, poté proseguire un programma per un'economia organica. Egli proseguì la politica di concentrazione industriale che, da una parte, mirava a razionalizzare gli investimenti e la gestione logistica e, dall'altra, puntava ad indebolire il movimento operaio, muovendosi più sul piano della differenziazione e parziale cooptazione di strati di operai qualificati, anziché ricorrere alla brutale repressione di cui una parte della borghesia industriale abbiamo detto essere stata protagonista.

Questa politica economica riformista incise sui profitti di molti monopolisti soprattutto dell'industria pesante anche perché

“queste riforme miravano alla posizione di guida all'interno dell'imperialismo tedesco riformista e progressista alla cui punta vi era AEG. Tutte queste non

---

<sup>5</sup>Forze di polizia, forze armate, apparati giudiziario e carcerario.

<sup>6</sup>Consorzio delle industrie elettriche.

erano, per Rathenau, misure di necessità, bensì l'inizio della realizzazione dei suoi piani [...]” (Gossweiler in Maffei (1980, pag. 90))

Questi piani però non furono sostenuti unitariamente dai proprietari dell'industria elettrochimica, così la politica inflazionistica, sostenuta dai grandi investitori dell'industria pesante della Ruhr, riuscì a limitare gli effetti di questo impianto di riforme, riuscendo a recuperare peso politico e ristabilendo tassi di profitto medi compatibili con quelli dell'industria elettrochimica.

Uno degli industriali più influenti di questo campo era Stinnes che affermava, in un discorso tenuto al consiglio dell'economia del Reich nel novembre 1922, che:

“[...] non si può perdere nessuna guerra e voler lavorare due ore di meno; questo non va, voi dovete lavorare e ancora lavorare e sempre di nuovo lavorare. [...] Ma dobbiamo perciò contrattare le migliori condizioni.”

Contrattare le migliori condizioni significava ristabilire rapporti di forza sia tra i diversi gruppi industriali, sia con la classe lavoratrice, che per l'industria pesante passava primariamente per il contenimento della pressione salariale, mentre per l'industria elettrochimica era strettamente legato all'innovazione tecnologica, sia del processo che del prodotto.

Emergono quindi due linee d'azione contraddittorie nel capitalismo tedesco del primo dopoguerra: dal '19 al '24 sono gli anni della ristrutturazione e razionalizzazione, operate mediante l'inflazione e la *cartellizzazione*<sup>7</sup>, da un lato, ed invece, dall'altro, tramite una riorganizzazione scientifica del lavoro, un crescente interventismo dello stato in materia economica e una politica più democratica e liberale.

Alla fine del 1923 inizia invece la cosiddetta fase di stabilizzazione<sup>8</sup>, in cui si assiste ad una contrazione dell'attività economica, ed emerge la necessità di dispiegare le piene capacità di ristrutturazione della produzione attraverso una forte razionalizzazione tramite innovazione tecnologica e introduzione di forme superiori di organizzazione del lavoro, oltre che di pianificazione economica. Si sviluppano strumenti analitici che valutano variabili macroeconomiche (investimento pubblico, inflazione, livello medio dei salari, tasso di rendimento medio etc) o, a livello aziendale, valutano, razionalizzano e mirano all'efficienza dei rapporti fra materie prime, forza-lavoro, investimenti, stock da una parte, e produzione, vendite e rendimenti dall'altra. Questi strumenti sono frutto

---

<sup>7</sup>I famosi Konzern: cartelli industriali verticali, che uniscono vari capitalisti lungo una filiera, dalle materie prime al prodotto finito.

<sup>8</sup>Per dare un'idea dell'asprezza dello scontro in atto, è utile ricordare che l'inizio di questo periodo è di poco successivo all'assassinio di Rathenau.

dell'affermarsi delle pratiche del fordismo molto più che quelle di Taylor. Invece che analizzare nei dettagli la produzione, si cercano i migliori rapporti conseguibili fra stati di ingresso e stati d'uscita, lasciando alla concorrenza o alla lotte dei lavoratori la soluzione organizzativa più adatta a garantire queste condizioni con i minori difficoltà<sup>9</sup>.

La stabilizzazione inizia con il blocco dell'inflazione tramite l'introduzione di un nuovo Marco, che spingerà i cospicui investimenti e prestiti statunitensi del Piano Dawes verso le aziende a maggior potenziale produttivo, mettendo le basi per la futura crisi dei primi anni trenta. Si avviano così una ristrutturazione e una crescita della produzione, che nel '27 raggiunge i livelli prebellici e che li supererà celermente. Le nuove forme della produzione necessiteranno di un crescente coordinamento e schemi di correlazione che consentano lo studio di un numero di dati in continuo aumento, non seguendone più l'evoluzione temporale dettagliata. (Baracca et al., 1979 e 1980, pagg. 40 e seguenti)

### 3.3 Lo sviluppo delle istituzioni scientifiche

Al termine del conflitto le posizioni idealistiche degli accademici ed intellettuali tedeschi escono irrobustite, anche a motivo della partecipazione massiccia di professori e studenti in forma attiva alla guerra, e il rafforzarsi di sentimenti nazionalistici a fronte della sconfitta, vissuta come umiliante ed indegna. Si rafforza così la corrente irrazionalistico-idealista (Baracca et al., 1979 e 1980, pag. 53)(Maffei, 1980), ma allo stesso tempo gli eventi bellici portano ad un prodigioso sviluppo tecnologico per cui si assiste alla crescita del prestigio della scienza agli occhi dell'opinione pubblica (Cassidy, 1996)(Maffei, 1980). Si tratta di un fenomeno diffuso nei principali paesi guerreggianti, basti ricordare che contemporaneamente si sviluppano forme artistiche idealistiche e romantiche che allo stesso tempo esaltano ed inglobano una fede incondizionata nello sviluppo tecnico-scientifico di cui il Futurismo italiano ne è un esempio.

Lo sforzo bellico aveva mostrato anche alle potenze vincitrici come il successo economico del mezzo secolo precedente e la forza militare<sup>10</sup> della Germania erano da ricercare nell'unione fra teoria e prassi, nell'inclusione organica della scienza nel processo produttivo, ovvero la scienza applicata all'industria. Si assiste a livello internazionale ad una crescita degli investimenti in ricerca, con la creazione di istituti anche molto specializzati grazie a finanziamenti sia pubblici che delle associazioni industriali. In particolare

---

<sup>9</sup>Che per certi versi, ed è interessante notarlo non per stabilire un qualche tipo di consequenzialità ma per mettere in luce inattese convergenze, sembrano trattare le variabili economiche come vedremo verranno trattate le variabili quantistiche nelle transizioni discontinue.

<sup>10</sup>Forza che solo l'impegno congiunto, sul piano militare e logistico, di tutti i paesi alleati riuscirà a vincere.

negli USA vengono poste le basi per il futuro di avanguardia scientifica mondiale, con una rete di istituti costruiti espressamente per la ricerca con un'amplissima disponibilità finanziaria, su cui si inserirà l'arrivo di numerosi tra i più importanti scienziati tedeschi, costretti alla fuga dal regime nazista. (Maffei, 1980, pag 163-164)

La guerra era stata un ottimo affare per il capitalismo tedesco nel suo complesso che, nonostante l'inflazione mietesse vittime negli strati proletari e della piccola borghesia, era riuscito e continuava a realizzare grandi profitti. Rimaneva aperta la questione di dove reinvestire queste plusvalenze (Baracca et al., 1979 e 1980). Se Harnack, tra i fondatori e a lungo presidente della K.W.G.<sup>11</sup>, ebbe a dire: "Il militarismo e la scienza sono i due solidi pilastri della Grösse Deutschlands la cui cura non deve mai cessare", il suo collaboratore Glum sottolineava come nella situazione attuale, poiché era praticamente scomparso il primo pilastro, l'"esercito", bisognava rafforzare il secondo (Maffei, 1980). Il campo della ricerca scientifica si presentava come uno degli sbocchi naturali e più convenienti per gli investimenti, anche perché una legge approvata dal Reichstag li detassava in toto.

Segno della crescente compenetrazione tra Stato, capitale e ricerca scientifica è la storia della K.W.G.: entrata nel primo conflitto mondiale con 7 istituti specifici ne conta 15 alla conclusione del conflitto fino ad arrivare a 30 negli anni successivi, molti dei quali strettamente legati ad un particolare settore economico e la cui copertura finanziaria era garantita da tali gruppi (come l'Istituto per la ricerca sul carbone e quello del ferro). La K.W.G. aveva compiti di collegamento dei singoli istituti e l'insieme della ricerca scientifica, Maffei (1980) rileva quindi che assolvesse a funzioni paragonabili a quelle di un moderno ministero della ricerca scientifica. Il finanziamento di base, stipendi e strutture, era garantito dalle finanze statali, ma il sostegno aggiuntivo delle associazioni di industriali era considerato centrale e capace di orientare largamente le scelte dell'istituzione.

Viste le divergenze all'interno del capitale tedesco questo istituto non era però in grado di rispondere prontamente alle necessità degli scienziati. Anche perché tra gli strumenti di controllo ed indirizzamento della ricerca scientifica da parte del capitale vi era la partecipazione diretta negli organismi di controllo ed indirizzo della KWG, che vedeva gli esponenti dell'industria e della finanza largamente maggioritari rispetto agli scienziati (Maffei, 1980, pag 170-171).

---

11

Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften che in italiano è: Società dell'imperatore Guglielmo per lo sviluppo delle scienze naturali.

Si possono individuare due tendenze<sup>12</sup> tra i fisici dell'epoca: una che vedeva il recupero del ruolo della scienza come strumento di rivalse ed ultimo vanto della Germania sconfitta e dileggiata all'estero e tradita in patria; l'altra invece animata da un sentimento antimilitaristico che trovava ampio consenso nel settore della ricerca fondamentale: primo fra tutti Albert Einstein (Baracca et al., 1979 e 1980, pag. 59).

Altre istituzioni scientifiche nascono invece dopo la conclusione del primo conflitto mondiale, in particolare per la loro rilevanza bisogna considerare la *Notgemeinschaft*<sup>13</sup>(NGW) e la *Helmholtz Gesellschaft*. Queste due organizzazioni raccoglievano spinte ed interessi diversi, la prima più legata agli ambienti governativi, riformatori e liberali e la seconda finanziata direttamente dai grandi gruppi industriali. Quest'ultima venne fondata da Carl Duisberg all'epoca dirigente della Bayer e principale artefice del Konzern della chimica, i cui principali finanziatori furono i membri del "padronato meno liberale e più intransigente: i Konzern del carbone, del ferro e dell'acciaio [...] fornirono i due terzi del capitale iniziale. [...]" (Baracca et al., 1979 e 1980). Gran parte dei finanziamenti delle due istituzioni furono indirizzati alla ricerca in fisica, tant'è che in breve tempo si arrivò a raddoppiare la disponibilità dei finanziamenti per la fisica rispetto al periodo prebellico. I finanziamenti da parte delle industrie, che nel caso della fisica e delle altre scienze, ad eccezione della chimica, rappresentava una parte piccola rispetto ai bilanci complessivi di università ed istituzioni scientifiche, per essere più efficaci furono distribuiti andando a sostenere progetti di ricerca individuali sulla base del merito, distribuendo i fondi direttamente al ricercatore senza neppure avvertire gli uffici amministrativi delle università o il ministero dell'educazione (Forman cit. in Baracca et al. 1979 e 1980, pag. 59). Questa modalità di finanziamento, spesso diretta verso le università periferiche, consentiva una maggiore libertà d'azione ed elaborazione. (Baracca et al., 1979 e 1980, pag. 59).

Per lo sviluppo della "fisica tecnica" nacque nel 1919 il "Deutsche Gesellschaft für Technische Physik" su iniziativa dei fisici della TH di Charlottenburg, che si poneva come scopo il sostegno della tecnica e dell'industria tedesca. L'antitesi è con la scienza pura delle università:

Totalmente diversi si presentano i principi della ricerca e l'evoluzione della fisica tecnica. Essa deve tener presente l'impossibilità di isolare nei processi tecnici il singolo fenomeno fisico, essa si trova di fronte molte volte a un gran

<sup>12</sup>Beninteso si tratta di una schematizzazione, i confini di queste due posizioni avranno modo di sfumarsi ed integrarsi vicendevolmente a seconda delle condizioni e dei luoghi.

<sup>13</sup>NGW che in italiano suona come "Comunità d'Emergenza" per la Scienza Tedesca, anche in risposta all'isolamento accademico (mai completo e durato pochi anni in realtà) dovuto al boicottaggio delle riviste scientifiche e delle università dei paesi vincitori.

numero di componenti nella presentazione delle quali deve essere oggetto, in prima linea, della sua ricerca questa mutua dipendenza e questa unione di una determinata azione. E queste ricerche non dipendono dal gioco del caso o dei pensieri, bensì dal principio dello sviluppo economico nella cultura umana.<sup>14</sup>

Negli anni dell'immediato dopoguerra dal 1919 al 1924 vi fu un forte spostamento delle iscrizioni dalle università alle T.H., che pur rimanendo minoritarie per numero di iscritti, videro una crescita favorita dal lavoro di organizzazioni come la Helmholtz Gesellschaft e dagli investimenti della borghesia industriale tedesca, che puntò su queste sia per far fronte al boicottaggio imposto dagli alleati, sia per procurarsi la mano d'opera tecnica altamente qualificata richiesta dal processo produttivo in espansione.

Sottolineano però Baracca, Livi e Ruffo (1979 e 1980) alle pagine 54 e 61: “Una caratteristica generale della programmazione scientifica nella Germania di Weimar fu data dal fatto che essa cessò di venire finalizzata direttamente (come lo era invece nella Germania Guglielmina) ad interessi produttivi. Si tendeva ora piuttosto a privilegiare programmi di ricerca a lungo termine [...] l'organizzazione della ricerca scientifica nella repubblica di Weimar si trasformò e si centralizzò in modo da ubbidire ad un controllo meno direttamente utilitaristico ed invece più politico ed ideologico”.

Senza voler stabilire nessun nesso causale, penso però che la conoscenza di questo quadro economico ed istituzionale e come esso avesse nella ricerca scientifica un terreno di scontro sia materiale che ideologico, possa servire a comprendere meglio quei passaggi che vedremo nel prossimo capitolo, a mio avviso non immediatamente giustificabili con una necessità imposta dai “fatti” scientifici.

---

<sup>14</sup>Nell'introduzione del “Giornale di fisica tecnica” Zeitschrift für Technische Physik, primo numero, 1920. Citato da Maffei (1980) a pag 216



## 4 La definizione della Meccanica Quantistica

### 4.1 Il programma di Bohr

Abbiamo visto, alla sezione 2.2, come la prassi scientifica che prende le mosse dalla prima rottura “planckiana” e si sviluppa su linee termodinamiche, nel senso precedentemente esplicitato, sia stata presto affiancata da un programma che, sebbene fosse strettamente legato ad essa rivolgeva lo sguardo altrove: il programma di Bohr. Sia dal punto di vista della domanda scientifica sia da quello della prassi, gli articoli di Bohr del 1913 parlano un linguaggio molto differente da quello della teoria dei quanti “termodinamica”.

[...] a calculation based on the ordinary mechanics gives the result, that a ring of electrons rotating round a positive nucleus in general is unstable for displacements of the electrons in the plane of the ring. *In order to escape from this difficulty, we have assumed that the ordinary principles of mechanics cannot be used in the discussion of the problem, in question, any more than in the discussion of the connected problem of the mechanism of binding of electrons.* [...] We have, on the contrary, assumed that the frequency of the radiation is determined by the condition  $h\nu=E$ , where  $\nu$  is the frequency,  $h$  Planck's constant, and  $E$  the difference in energy corresponding to two different "stationary" states of the system.(Bohr, 1913, pag 480)

Questo brano è tratto dalla seconda delle tre parti che compongono il “On the constitution of atoms and molecules”, pubblicato sul Philosophical Magazine tra Luglio e Novembre del 1913, e mostra subito alcune questioni: il problema della stabilità dell'atomo di idrogeno è affrontato come stabilità di un sistema isolato. L'atomo di Bohr è un sistema ideale che, sulla base delle idee e gli esperimenti di Rutherford, è costituito da un nucleo centrale carico e degli elettroni che ruotano su orbite circolari. Per “sfuggire” ai problemi che la descrizione su basi classiche dell'atomo dà, la soluzione di Bohr è quella di stabilire arbitrariamente alcune condizioni specifiche. Le leggi classiche si possono

però utilizzare (per calcolare l'energia degli stati, ad esempio) soltanto attenendosi ad un chiaro fatto sperimentale: gli atomi sono in larga misura stabili. Da qui l'ipotesi, nel suo complesso arbitraria, che le orbite su cui si trovano gli elettroni siano stabili e gli scambi di energia siano quantizzati e non siano applicabili le leggi classiche. Nella terza parte di "On constitution of atoms and molecules", apparsa nel Novembre del 1913, Bohr riassume così quattro assunzioni principali riguardanti il suo modello:

[...] In the present paper an attempt has been made to develop a theory of the constitution of atoms and molecules on the basis of the ideas introduced by Planck in order to account for the radiation from a blackbody, and the theory of the structure of atoms proposed by Rutherford in order to explain the scattering of alpha-particles by matter. [...] is therefore necessary to introduce new assumptions as to the emission and absorption of radiation by an atomic system. The main assumptions used in the present paper are: 1. That energy radiation is not emitted (or absorbed) in the continuous way assumed in the ordinary electrodynamics, but only during the passing of the systems between different "stationary" states. 2. That the dynamical equilibrium of the systems in the stationary states is governed by the ordinary laws of mechanics, while these laws do not hold for the passing of the systems between the different stationary states. 3. That the radiation emitted during the transition of a system between two stationary states is homogeneous, and that the relation between the frequency  $\nu$  and the total amount of energy emitted  $E$  is given by  $E = h\nu$ , where  $h$  is the Planck's constant. 4. That the different stationary states of a simple system consisting of an electron rotation round a positive nucleus are determined by the condition that the ratio between the total energy, emitted during the formation of the configuration, and the frequency of revolution of the electron is an entire multiple of  $\frac{h}{2}$ . [...] It is shown that, applying these assumptions to Rutherford's atom model, it is possible to account for the laws of Balmer and Rydberg connecting the frequency of the different lines in the line-spectrum of an element. [...] (Bohr, 1913, pag 874)

Einstein e Nernst avevano proposto di trattare il problema del corpo nero supponendo l'esistenza di una energia di punto zero e mantenendo poi una trattazione tramite una teoria continua. La possibilità di spiegare la stabilità dell'atomo attraverso la teoria elettromagnetica continua, invece, è stata esplorata vari decenni più tardi, sicuramente

da Boyer (1975). In un articolo del 1975<sup>1</sup> egli ha dimostrato come con la teoria elettromagnetica classica, scegliendo “boundary condition” adeguate per il potenziale vettore  $A$  ed in particolare utilizzando l’ipotesi di un campo di radiazione casuale come condizione al contorno, sia possibile ricavare molti risultati che danno previsioni sperimentali verificabili, che si solgono attribuire in maniera esclusiva alla Meccanica Quantistica. Questi approcci assieme ad importanti altri (Baracca et al., 1979 e 1980, nota 5), forniscono solo alcune previsioni, comunque in accordo con quelle fornite della meccanica quantistica. Queste però ci consentono di affermare che non tutti i risultati raggiungibili con le teorie “continue” fossero stati esplorati e che non siano quindi solo ed esclusivamente i limiti della teoria nel fornire spiegazioni a determinati fenomeni ad aver spinto al loro superamento.

#### 4.1.1 Impostazioni nuove e problemi diversi

Bohr si pone domande diverse e in discontinuità con l’impostazione “termodinamica”. Egli introduce la problematica della struttura atomica<sup>2</sup> che fino a quel momento è stata lontana dagli interessi dei più importanti fisici quantistici. Ma ancora di più a rappresentare una novità è la questione degli spettri di emissione atomici che anche Bohr non aveva considerato fino al 1912, preferendo occuparsi dei legami chimici, ma che dal fondamentale lavoro del 1913 diventano cuore pulsante delle sue ricerche. Ma ciò che rappresentano i punti più innovativi negli studi di Bohr sono il suo atteggiamento a livello metodologico e di libertà di ipotesi.

Sia Petruccioli (1976) che Baracca, Livi e Ruffo (1979 e 1980) citano una relazione tenuta da Bohr nel Dicembre 1913 presso la Società di Fisica di Copenhagen e poi pubblicata nel 1914, che mostra in più passaggi la consapevolezza del fisico danese riguardo la novità del proprio approccio ai problemi atomici e all’utilizzo della teoria dei quanti. Ci limitiamo a riportare alcuni passaggi particolarmente significativi:

[...] accettandola [la teoria di Planck] abbiamo manifestamente ammessa l’inadeguatezza dell’elettrodinamica classica e ci siamo definitivamente scostati da quel coerente insieme di principi su cui essa si basa.

<sup>1</sup>The problems of the stability of matter against atomic collapse are a case where traditional classical electron theory, which assumes the boundary condition  $A^{in} = 0$ , seems to fail (Boyer, 1975).

<sup>2</sup>Un altro contributo in questa direzione del fisico Austriaco Hass che nel 1910 presentò una trattazione tramite l’ipotesi dei quanti delle proprietà dell’atomo di Thomson, in cui riusciva ad esprimere la costante  $h$  in funzione dei parametri atomici, ottenendo un valore teorico per la carica dell’elettrone in accordo con gli ultimi dati del Cavendish Laboratory. Questa tesi venne però “rifiutata e addirittura ridicolizzata” perché la teoria dei quanti era considerata una “parte della teoria del calore” (Jammer in Baracca, Livi, Ruffo Baracca et al. (1979 e 1980)) oltre al fatto che il modello dell’atomo di Thomson aveva già mostrato i suoi numerosi limiti.

[...] È chiaro che non sto in alcun modo cercando di dare ciò che ordinariamente si suol definire una *spiegazione*: nulla è stato infatti detto sul come e sul perché la radiazione viene emessa.

Si comprenderà perciò come io non mi prefigga di dare una spiegazione alle leggi spettrali, ma cerchi invece di indicare un modo con cui sembra possibile mettere le leggi spettrali in confronto con altre proprietà degli elementi che appaiono altrettanto inesplicabili sulla base delle attuali conoscenze scientifiche.

compare in seguito una felice annotazione sulla sorprendente coincidenza, di cui egli aveva constatato l'esistenza, tra i processi radiativi quantistici e la loro controparte classica nel limite delle basse frequenze:

Su un punto possiamo però attenderci un nesso con le concezioni ordinarie: che sia possibile, cioè, calcolare l'emissione delle oscillazioni elettromagnetiche lente sulla base dell'elettrodinamica classica.

Alcune caratteristiche dell'approccio di Bohr sono molto simili a come Heisenberg, nel suo famoso lavoro del 1925, imposterà i problemi della ricerca di una nuova meccanica con riferimento a sole quantità osservabili :

L'oggetto dell'osservazione diretta è la distribuzione dell'energia raggiante tra le varie lunghezze d'onda. Anche se possiamo supporre che questa energia provenga da sistemi di particelle oscillanti, sappiamo poco o nulla di questi sistemi. [...] È perciò molto interessante aver potuto dimostrare che per ottenere le leggi della radiazione termica non è necessario fare alcuna ipotesi sui sistemi emittenti [...]

Si può dire che inizi qui il lungo percorso che porta alla Meccanica Quantistica, essa avrà, però, bisogno delle trasformazioni complessive che abbiamo delineato al precedente capitolo per affermarsi definitivamente come succederà nella seconda metà degli anni '20. Se quindi in questi lavori di Bohr bisogna guardare alla sua impostazione e al suo programma di ricerca - che proseguirà per più di un decennio affinando concetti quale il principio di corrispondenza e in seguito la complementarità - per comprendere il concretizzarsi dell'interpretazione "ortodossa" della MQ, non si può però prescindere dalle profonde trasformazioni che mutano nuovamente in pochi anni il ruolo della scienza e degli scienziati in Germania (e poi negli USA).

### 4.1.2 Il principio di corrispondenza

A Bohr fanno capo le ricerche che quell'eccezionale comunità di scienziati, raccoltasi attorno alle scuole di Gottinga e Copenhagen, condusse per tutti gli anni venti. Si può parlare di un programma di ricerca di Bohr che si precisa e prende corpo negli anni che vanno dal 1913 alla fine del 1917 (Petruccioli, 1976). A partire dall'originale argomento di indagine - come abbiamo visto si concentra sullo studio della struttura atomica - Bohr avevano constatato - lo abbiamo già notato - una convergenza fra i risultati della teoria quantica applicata all'atomo di idrogeno e la teoria classica nella regione degli alti numeri quantici<sup>3</sup>. Se va sottolineato che non è già questa constatazione una prima formulazione del principio di corrispondenza, va però altrettanto messo in luce che questa constatazione sarà ben feconda nel suggerire a Bohr l'elaborazione di tale principio: appare chiaro infatti che considerasse questa coincidenza qualcosa più di una fortunata situazione dovuta al particolare formalismo adottato (Petruccioli, 1976).

Sul finire della prima guerra mondiale, nel 1918, il fisico danese si pone l'obiettivo di chiarire il livello raggiunto dalla conoscenza sulla struttura atomica e i processi radiativi. Il lavoro di sistematizzazione, che non giungerà mai a completamento, chiarisce molto bene lo sviluppo e il significato del Principio di Corrispondenza e l'idea delle pratiche e del ruolo che Bohr assegna alla scienza fisica.

Einstein l'anno precedente avanzava un'ipotesi riguardo i coefficienti di probabilità associati a ogni salto quantico nel tentativo di adeguare i postulati di Bohr del '13 alla sua concezione corpuscolare della radiazione, in questi Bohr vede invece la più diretta e importante corroborazione del suo postulato quantico: non appena l'elettrone inizia un salto quantico si perde la possibilità di seguirne il moto e di descriverlo meccanicamente, ciò che rimane è una correlazione fra lo stato iniziale e quello finale descritta dalla probabilità di transizione associata ai particolari numeri quantici corrispondenti agli stati stazionari interessati dalla transizione (Petruccioli, 1976).

Nel lavoro ricompositivo che Bohr inizia nel 1918 si concentra come abbiamo detto sulle probabilità di transizione fra due stati stazionari e, ormai maturo il principio di corrispondenza, si concentra in particolare sulla trattazione degli alti numeri quantici dove le equazioni quantistiche sembrano tendere a quelle differenziali di Maxwell-Lorentz. Là dove il concetto di stato stazionario perde il suo carattere individuale, dato che è

---

<sup>3</sup>In realtà nella citazione che abbiamo riportato nella sezione precedente Bohr parla di basse frequenze e non alti numeri quantici e, come nota Van der Waerden (1967), lo fa anche nel primo capitolo della memoria del 1918, mentre parla esplicitamente di alti numeri quantici dal secondo capitolo di tale memoria. I due limiti sono differenti, come mostra il caso dell'oscillatore armonico, anche se spesso coincidono. "It seem that Bohr, in his preliminary announcement in § 1, did not clearly distinguish between the two limiting case"

impossibile distinguere tra condizioni dinamiche differenti per differenti numeri quantici<sup>4</sup> allora si danno le premesse per cui l'elettrodinamica classica è in grado di trattare e risolvere il problema dell'interazione fra radiazione e particella carica accelerata. Ciò che si domanda Bohr è però, non come stabilire un punto limite alla validità delle leggi quantistiche o classiche, ma piuttosto utilizzare questa corrispondenza fra le due per determinare le condizioni a cui è soggetta la probabilità di transizione. Questo punta a definire e specificare le probabilità di transizione senza attenuare le divergenze con la "vecchia" fisica.

Bohr sviluppa nella prima memoria del '18 la trattazione in relazione agli alti numeri quantici, utilizzando in modo formale risultati della meccanica statistica classica e della meccanica Hamiltoniana. La connessione che si instaura tra teoria quantistica e teoria classica, permessa dal linguaggio matematico, rimane però confinata all'ambito formale. Per Bohr permane infatti una profonda distinzione tra i contenuti dell'elettrodinamica e quelli della fisica quantistica: anche nella regione limite "durante" il salto quantico l'elettrone conserva la sua individualità e discontinuità (Petruccioli, 1976).

Sebbene gli strumenti teorici fossero già adatti a formulare un coerente principio di corrispondenza solo nel 1920 Bohr ne darà una formulazione consistente:

Pur dovendo ammettere che la meccanica ordinaria non può venire usata per la descrizione delle transizioni tra stati stazionari, è stato nondimeno possibile costruire una teoria consistente di questi stati sull'ipotesi che il movimento possa venire descritto in base alla meccanica ordinaria. Inoltre, benché sia impossibile seguire il processo di radiazione associato alla transizione, sulla base delle consuete concezioni elettromagnetiche secondo le quali la natura della radiazione emessa da un atomo è direttamente condizionata dalla natura del sistema e dalle componenti armoniche del sistema, si è mostrato che esiste una profonda *corrispondenza* tra i vari tipi di transizioni possibili tra gli stati stazionari da una parte e le componenti armoniche dall'altra. Trattasi di una corrispondenza di natura tale che la presente teoria degli spettri può in un certo senso essere considerata come una generalizzazione razionale della teoria ordinaria della radiazione. (Bohr in una conferenza alla società di fisica di Berlino 1920 in (Petruccioli, 1976, pag. 264))

Nel '22 conclusa la terza parte delle quattro annunciate nel '18 del suo lavoro-sintesi Bohr sente la necessità di riprendere dall'inizio il filo del discorso, privilegiando una

---

<sup>4</sup>Ovvero che la variazione delle condizioni dinamiche è per questi stati infinitesima, tanto da renderli pressoché privi di carattere individuale

riflessione critica sui problemi connessi alle trasformazioni concettuali imposte dalla fisica quantistica piuttosto che sui contenuti tecnici emergenti dalle più recenti acquisizioni teoriche e sperimentali.

Una constatazione è centrale in questo lavoro: esiste una netta distinzione tra gli eventi della fisica “microscopica” che definiscono la realtà fisica della struttura più intima della materia e la dimensione “macroscopica” dei dispositivi concettuali e tecnici con cui sondiamo e descriviamo la natura. La fisica classica rimane insomma lo strumento con cui descriviamo e analizziamo le grandezze osservabili<sup>5</sup> derivanti da un mondo microscopico di cui la fisica quantistica è la rappresentazione formale. Questa separazione netta e inconciliabile necessita di una ricerca di una autonomia concettuale della fisica quantistica che va verificata tramite la sua non-contraddittorietà e coerenza logica.

È in questo senso che si può dire che il principio di corrispondenza si evolve nei lavori di Bohr “da *cerniera* con le concezioni classiche alla sostituzione di *spiegazioni* di vecchio tipo con correlazioni formali, a *base* per l’elaborazione della teoria degli atomi a molti elettroni ed infine a base per la costruzione delle concezioni quantistiche stesse”(Baracca et al., 1979 e 1980), per poi come vedremo essere utilizzato in modo completamente formale da Heisenberg e Born per definire la nuova Meccanica Quantistica, con il passaggio dalle parentesi classiche di Poisson alle regole di commutazione degli operatori autoaggiunti.

## 4.2 Probabilità e corrispondenza fino alla Meccanica delle Matrici

Abbiamo notato come Bohr riprenda l’ipotesi sulla probabilità di transizione proposta da Einstein nel ’17, attribuendogli un significato decisamente diverso, ed è per gli stessi motivi che ancora nel ’24 il rifiuto dell’ipotesi dei fotoni muove il noto lavoro B.K.S.<sup>6</sup>. Questa disparità di vedute poggia sull’inaccettabilità per Bohr del giudizio di Einstein sul grado di incompletezza della fisica quantistica che legittima unicamente un approccio statistico allo studio dell’interazione tra radiazione e materia. Se per Einstein lo studio della probabilità è intrinsecamente legato alla meccanica statistica, per Bohr la probabilità è una proprietà associata ad un singolo microoggetto in uno stato stazionario. Bohr rigetta l’ipotesi del quanto di luce e prosegue per altra via lo studio dell’interazione fra radiazione e materia nonostante la - largamente accettata - conferma sperimentale do-

---

<sup>5</sup>Che sono appunto tali nell’ambito della nostra possibilità di descrizione “classica”

<sup>6</sup>Bohr, Kramers e Slater

vuta a Compton. Quest'ultimo, infatti, già nel '22<sup>7</sup> misurava la variazione di lunghezza d'onda che accompagna lo scattering dei raggi  $X$  da parte degli elettroni accreditando l'ipotesi del fotone.

Landeburg nel '21 aveva affrontato il problema della dispersione eguagliando l'espressione classica per l'intensità di una linea di assorbimento con l'espressione quanto-teorica nel limite degli alti numeri quantici e - a partire da questo lavoro e sulla base delle idee sviluppate dal giovane fisico di origine statunitense Jhon C. Slater - nella memoria del gennaio 1924 Bohr, Kramers e Slater approfondiscono il problema della dispersione<sup>8</sup> e delle "cause" che giustifichino determinate transizioni tra stati stazionari. B.K.S. cercano "di ottenere una descrizione sensata dei fenomeni ottici in stretta connessione con il significato degli spettri secondo la teoria dei quanti" tramite l'introduzione di oscillatori virtuali e un campo di radiazione virtuale.

Se l'ipotesi degli oscillatori era già presente implicitamente nel lavoro di Landeburg come nota Van der Waerden (1967), il campo di radiazione virtuale è un'ipotesi di Slater: "Any atom, in fact, be supposed to communicate with other atoms all the time it is in a stationary state, by means of a virtual field of radiation originating from oscillators having the frequencies of possible quantum transitions and the function of which is to provide for statistical conservation of energy and momentum by determining the probabilities for quantum transitions"<sup>9</sup>. Nel lavoro collettaneo come nota Van der Waerden (1967) compaiono tre idee fondamentali frutto della mediazione<sup>10</sup> delle posizioni dei tre autori:

1. Slater's idea of a "virtual radiation field"
2. Statistical conservation of energy and momentum
3. Statistical independence of the processes of emission and absorption in distant atoms.

---

<sup>7</sup>I risultati furono pubblicati su Physical Review nel maggio el 1923 nell'articolo da titolo "A quantum theory of the scattering of X-rays by Light Elements"

<sup>8</sup>Che da alcuni anni interessava Bohr per la sua caratteristica di essere spiegabile in termini della teoria classica e il problema di conciliarla invece con il modello atomico quantizzato.

<sup>9</sup>Nella lettera di Slater a Nature del 28 Gennaio 1924 cit. in Van der Waerden (1967)

<sup>10</sup>Van der Waerden (1967) riporta una lettera inviatagli da Slater che su sua richiesta spiega : "[...] statistical conservation of energy and momentum was put into the theory by Bohr and Kramers, quite against my better judgment." Mentre Baracca et al. (1979 e 1980) riportano da "Solid state and Molecular Theory: A Scientific Biography" di Slater stesso nel 1975: "[...] essi rifiutavano recisamente di ammettere l'esistenza reale dei fotoni [...] essi insistettero perché scrivessimo un lavoro in cui il campo elettromagnetico era descritto come costituito da una densità di energia distribuita con continuità, la cui intensità determinava la probabilità di transizione [...] Si doveva allora assumere solo una conservazione statistica [...] Essi controvoglia mi consentirono di inviare una nota a *Nature* che indicasse che la mia idea originaria aveva incluso l'esistenza reale dei fotoni [...]"

Gli oscillatori virtuali rappresentano in fin dei conti, nella teoria di B.K.S. e nell'impostazione di Bohr un mero strumento simbolico-formale con cui approfondire la conoscenza sui processi di transizione discontinua all'interno dell'atomo. Conoscenza che si approfondisce, nonostante le ipotesi 2 e 3 vengano confutate dai successivi sviluppi, come scrive Heisenberg in (Heisenberg et al., 1959)

I lavori di Bohr, Kramers e Slater contenevano tuttavia l'idea di importanza decisiva che le leggi naturali non determinano il verificarsi d'un avvenimento, ma la probabilità che esso si verifichi [...] Le onde di probabilità di B.K.S. possono essere interpretate come una formulazione quantitativa del concetto aristotelico di *dúnamis*, di possibilità, chiamato anche più tardi con il nome latino di *potentia*.

È proprio il principio di corrispondenza, inserito nel quadro del vasto programma di ricerca di Bohr, a spiegare questo approccio che arriva a supporre la violazione "microscopica" dei principi di conservazione dell'energia e dell'impulso. B.K.S. ricorrono ad un'immagine classica utilizzata in modo formale per esplorare le peculiarità dei microoggetti in cui sono validi come postulati le caratteristiche di discontinuità e forte singolarità che negano qualsiasi compatibilità con la fisica classica stessa.

Uso più operativo-pragmatico e molto meno programmatico, del principio di corrispondenza, ne fecero invece Kramers, Heisenberg e Born. Kramers poche settimane dopo la memoria con Bohr e Slater ottiene un'espressione per l'ampiezza del momento elettrico dell'atomo che interviene nella produzione delle onde "secondarie" di dispersione e lo fa dando corpo all'idea che si possa passare dalla formula classica a quella quantistica semplicemente sostituendo ai coefficienti differenziali differenze finite tra grandezze discrete.

Per ottenere una espressione generale valida per tutti i numeri quantici notiamo che, mentre le frequenze  $\omega$  delle componenti armoniche del moto sono date dalla formula generale  $\omega = \frac{\partial H}{\partial I}$ , l'esatta espressione della frequenza delle righe spettrali è data dalla relazione quantistica generale  $\nu_q = \frac{\Delta H}{h}$  dove  $\Delta H$  indica la differenza dell'energia  $H$  in due stati stazionari [...]. La stessa assunzione mostra che, in una generalizzazione della formula [...] il simbolo  $\frac{\partial}{\partial I}$  deve essere sostituito da una analoga differenza simbolica divisa per  $h$ . Ciò è quanto si è fatto per ricavare la formula [quantistica della dispersione].<sup>11</sup>

Born per linee differenti arriverà a risultati simili:

<sup>11</sup>Kramers, "The quantum theory of dispersion", Nature, 114(1924), cit. in (Petruccioli, 1976, pag. 312)

D'altra parte la stessa meccanica subir  un cambiamento, nel senso di un passaggio da equazioni differenziali a equazioni in cui compaiono differenze finite [...].<sup>12</sup>

Emerge qui la cosiddetta “regola di corrispondenza” di Born in cui il Principio di Corrispondenza funziona da guida per la sostituzione delle equazioni differenziali con equazioni alle differenze finite. Born con Heisenberg considerano la corrispondenza *essenzialmente ed univocamente* (Petruccioli, 1976) come uno strumento per la fondazione di un linguaggio matematico capace di esprimere le relazioni in gioco nelle transizioni quantiche. Il titolo del lavoro appena citato di Born introduce il nome di “meccanica quantistica”, ma rimane vero che era necessario in questa trattazione ricercare la soluzione classica del problema per poi reinterpretarla quantisticamente. La realizzazione di un formalismo “completo,” che fin da subito contenga esclusivamente relazioni quantistiche, spetter  a Heisenberg.

Dopo altri significativi lavori che escono a firma di Kramers, Van Vleck, Kramers con Heisenberg, Kuhn e Thomas, nel luglio 1925 viene pubblicato su *Zeitschrift für Physik* il fondamentale lavoro di Heisenberg dal titolo “ ber quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen” le cui idee principali cercher  di sintetizzare nei prossimi paragrafi, seguendo in larga misura Van der Waerden (1967).

Heisenberg parte dalla constatazione che alle dimensioni atomiche la meccanica classica non   pi  valida, afferma per  che la nuova teoria deve essere coerente con il Principio di Corrispondenza ed infatti nel lavoro ogni formula quantistica   motivata con la corrispondente formula classica. Inoltre, seguendo i risultati raggiunti da Kramers e Born, Heisenberg ribadisce che per inglobare il principio di Corrispondenza nel formalismo matematico bisogna sostituire le equazioni differenziali con equazioni alle differenze finite.

La prima novit  contenuta nell'articolo   l'accento sulla necessit , non tanto di introdurre una nuova meccanica, quanto che cadano alle dimensioni atomiche i requisiti per una cinematica classica e che sia quindi necessario introdurne una di tipo nuovo. In accordo con questo si pu  pensare di mantenere l'equazione del moto  $\ddot{x} + f(x) = 0$  a patto di rigettare l'interpretazione che la variabile  $x$  rappresenti una posizione dipendente dal tempo. Ma allora va trovata una quantit  che sostituisca  $x$  nell'equazione del moto e a questo Heisenberg premette - e vi insiste molto nell'introduzione - che vanno introdotte nella teoria solo grandezze osservabili. Per questo, partendo dalla rappre-

---

<sup>12</sup>M. Born, “ ber Quantenmechanik” in *Zeitschrift für Physik* ricevuto il 13 giugno 1924 citato in (Petruccioli, 1976, pag. 313)

sentazione in serie di Fourier della  $x(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} a_{\alpha} e^{i\alpha\omega t}$ , vi sostituisce termini del tipo  $a(n, n - \alpha) e^{i\omega(n, n - \alpha)t}$  che dipendono esclusivamente dagli stati iniziale  $n$  e finale  $n - \alpha$ . Dove in pratica gli  $a(n, n - \alpha)$  sono le ampiezze del momento elettrico degli oscillatori virtuali associati alla transizione tra gli stati a cui corrisponde la radiazione emessa con frequenza  $\nu = \frac{\omega(n, n - \alpha)}{2\pi}$ .

L'aspetto forse più rimarcato del lavoro di Heisenberg del luglio 1925 è quello della rinuncia ad una descrizione modellistica e la richiesta che la nuova meccanica si basi esclusivamente su grandezze osservabili. Il fisico tedesco è convinto che la posizione sia una grandezza non osservabile per l'elettrone e perciò introduce le quantità che abbiamo prima presentato proprio perché mostra come le  $|a(n, n - \alpha)|^2$  siano proporzionali alla probabilità di transizione e quindi alle intensità delle righe emesse, direttamente osservabili.

Questo approccio, anche per come viene esposto nell'articolo, è sembrato ad alcuni quasi aderente ai principi empiristi di Mach. Però annunciando di ricondurre la fisica verso posizioni più concrete la condurrà invece ad un livello di astrazione formale di nuova portata.

Si può accreditare la posizione di Heisenberg come perfettamente in linea ed anzi evoluzione razionale delle idee di Bohr e del Principio di Corrispondenza<sup>13</sup>. Questa impostazione è vissuta, almeno all'interno dell'ampia parte dei fisici organici a questo nuovo tipo di interpretazione della realtà fisica come una liberazione dai lacci che tenevano ancorata la fisica quantistica a considerazioni modellistiche classiche.

Heisenberg giunge in questo lavoro fino all'abbozzo di quella che sarà l'algebra della meccanica delle matrici: introduce le regole di moltiplicazione tra grandezze quantistiche come conseguenza necessaria delle relazioni di combinazione delle frequenze. Queste relazioni soddisfano l'equazione  $\omega(n, n - \alpha) + \omega(n - \alpha, n - \beta) = \omega(n, n - \beta)$  da cui si deduce che il termine  $a(n, n - \alpha) e^{i\omega(n, n - \alpha)t}$  debba essere moltiplicato per un termine del tipo  $a(n - \alpha, n - \beta) e^{i\omega(n - \alpha, n - \beta)t}$  perché si ottenga  $i\omega(n, n - \beta)t$  all'esponente. Infine introduce la regola di quantizzazione nell'ambito del nuovo formalismo imponendo  $\int m \dot{x} dx = J = nh$  e sostituendo l'espressione adeguata per  $x$ , fino ad ottenere  $h = 4\pi m \sum_{\alpha=0}^{\infty} \{|a(n, n + \alpha)|^2 \omega(n, n + \alpha) - |a(n, n - \alpha)|^2 \omega(n, n - \alpha)\}$ , stabilendo il valore di  $a(n, n - \alpha)$  per il più piccolo valore di  $n$ . Quest'ultimo risultato viene ricavato facilmente avendo interpretato il coefficiente  $a(n, n - \alpha)$  come proporzionale alla probabilità di transizione. Infatti se

<sup>13</sup>Come Bohr stesso noterà: "L'intero apparato della M.Q. può venir considerato come una formulazione precisa delle tendenze racchiuse nel principio di corrispondenza" (Bohr in *Nature*, 116, pag. 852)

#### 4 *La definizione della Meccanica Quantistica*

$n$  è il numero quantico dello stato fondamentale la probabilità di una transizione verso uno stato con numero quantico inferiore è zero, sicché  $a(n, n - \alpha) = 0$ .

Prestissimo i risultati di Heisenberg verranno largamente generalizzati dal lavoro di Born e Jordan, quest'ultimo su richiesta del primo analizza la regola di moltiplicazione trovata da Heisenberg e la interpreta come regola di moltiplicazione tra matrici, mentre la regola di quantizzazione che abbiamo visto sarà generalizzata dai due con le regole di commutazione tra gli operatori quantistici. Nel giro di pochissimi mesi la formulazione della Meccanica Matriciale verrà ad assumere un aspetto coerente e riuscirà a risolvere molte delle principali questioni lasciate in sospeso negli anni precedenti.

## 5 Conclusioni

Ho evidenziato nel corso del capitolo 2 una trasformazione dei modi di fare scienza legata agli sviluppi tecnologici ed economici della seconda rivoluzione industriale. Lo sviluppo produttivo che interessò la Germania a partire dagli anni 1870 fornì capacità e condizioni sperimentali nuove; trasformò sia la percezione sia la realtà del ruolo che la scienza occupava nel sistema sociale e destinò molte risorse economiche alla ricerca scientifica. Queste opportunità nuove verranno utilizzate dalla fisica dei primi anni del XX secolo fino all'affermarsi di una prassi ancora differente.

Nel capitolo 3 ho descritto le trasformazioni economiche e delle istituzioni scientifiche che a mio avviso hanno contribuito a questa seconda trasformazione. A partire dalla prima guerra mondiale le maggiori concentrazioni economiche della Germania, che erano uscite rafforzate dalla guerra, in parte accettano di buon grado e in parte determinano accelerazioni sia a livello di disponibilità economiche per la ricerca di base, sia di libertà di scelta da parte dei ricercatori. All'interno di una crescente divisione del lavoro<sup>1</sup>, la ricerca si specializza e si sviluppa la fisica teorica, che abbiamo seguito nel suo sviluppo interno nel capitolo 4, con un livello di organizzazione della ricerca decisamente superiore, sia quantitativamente che qualitativamente.

Queste accelerazioni, a mio avviso, favoriscono il penetrare nella prassi scientifica di modi e approcci che si consolidano in questi anni. Si verificano degli strappi e sfilacciature che lasciano i fisici più legati alla “vecchia” prassi sempre più isolati da una struttura coerente che ne amplifichi e sostenga l'operato. Emerge con la nuova prassi un nuovo rapporto con la natura, abbozzato e guidato dalle idee di Bohr, che già nel 1913 introduceva, sebbene in una forma che aveva bisogno di molti aggiustamenti e definizioni, correlazioni fra stati in ingresso e stati in uscita come rappresentazione formale della realtà.

La forza operativa della nuova Meccanica Quantistica, che abbiamo visto nascere alla fine del capitolo 4, emerge sempre più negli anni seguenti e trova conferme materiali nelle tecnologie: dall'energia atomica, per impieghi militari e civili, al transistor. Emergono

---

<sup>1</sup>Da un lato, con lo sviluppo delle istituzioni scientifiche che razionalizzano e concentrano la gestione della formazione, della didattica e degli aspetti burocratici relativi ai finanziamenti. Da un altro, con l'approfondirsi di una separazione tra ricerca teorica e ricerca sperimentale.

però ben presto degli ostacoli: se è indubbio che gli sviluppi seguiranno la via aperta dalla MQ, conciliarla con la relatività ristretta porrà dei problemi che hanno a che fare con la sua struttura formale e metodologica<sup>2</sup>. Su questo punto Pauli ricorderà:

Mentre la meccanica quantistica non relativistica è una teoria di corrispondenza, nel senso che è un'applicazione diretta delle regole formali della teoria quantistica al corrispondente formalismo classico è praticamente priva di ambiguità e conduce a risultati fisicamente corretti, la situazione è più complicata appena si richieda la invarianza relativistica del formalismo. [...] la teoria nella sua forma finale divenne un formalismo riferentesi a un sistema che comprende un numero di elettroni negativi e positivi arbitrario e, in generale, trasgredendo così l'originale contesto della corrispondenza. (Pauli, 1955 cit. in Baracca et al. (1979 e 1980, pag. 76)

Il quadro del Principio di Corrispondenza che ha fatto da contesto-guida per la definizione della nuova meccanica, rivelerà i suoi limiti che verranno aggirati in una situazione differente da quella che abbiamo descritto, sia perché il centro degli sviluppi si sposterà geograficamente, e artefici di questo passaggio saranno anche un gran numero di fisici tedeschi costretti all'esilio dalle politiche naziste, sia perché questo spostamento coinciderà con livelli di organizzazione della ricerca, finanziamenti, divisione del lavoro e ambiente produttivo ben differenti, non tanto presi singolarmente, ma proprio per la loro contemporaneità.

---

<sup>2</sup>Il passaggio dalla meccanica quantistica galileiana a quella relativistica (che altro non è che una teoria dei campi quantizzati) è solo uno dei problemi. L'altro riguarda la, non ancora raggiunta, gravità quantistica.

## Bibliografia

- [Baracca 2005a] BARACCA, Angelo: 1905, Annus Mirabilis: the Roots of the 20th-Century Revolution in Physics and the Take-off of the Quantum Theory. In: *Llull: Revista de la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas* 28 (2005), Nr. 62, S. 295–382
- [Baracca 2005b] BARACCA, Angelo: Mechanistic Science, Thermodynamics, and Industry at the End of the Nineteenth Century. In: CAPRIA, Marco M. (edit.): *Physics Before and After Einstein*. Nieuwe Hemweg 6B 1013 BG Amsterdam Netherland : IOS press, 2005, S. 49–70
- [Baracca et al. 1979 e 1980] BARACCA, Angelo ; LIVI, Roberto ; RUFFO, Stefano: Le tappe dello sviluppo della teoria dei quanti nel quadro della seconda rivoluzione industriale e delle contraddizioni del capitalismo del primo dopoguerra- Parte I e II. In: *Testi & Contesti* 2 e 3 (1979 e 1980)
- [Baracca et al. 1979] BARACCA, Angelo ; RUFFO, Stefano ; RUSSO, Arturo: *Scienza e industria 1848-1915*. prima. Editori Laterza, Marzo 1979 (Universale Laterza). – 355 S
- [Besana 1976] BESANA, Luigi: La meccanica ondulatoria di Louise De Broglie. In: *Contributi alla storia della meccanica quantistica* Bd. 7. Domus Galilaeana, 1976
- [Bohr 1913] BOHR, Niels: On the Constitution of Atoms and Molecules Parte I, Parte II e Parte III. In: *Philosophical Magazine* 26 (1913), luglio, settembre e novembre, S. 1–25, 476–502 e 857–875
- [Bohr 1913] BOHR, Niels: The Spectra of Helium and Hydrogen. In: *Nature* 92 (1913), Ottobre, S. 231–232
- [Bohr 1914 – 1961] BOHR, Niels: Lo spettro dell'idrogeno. In: *Teoria dell'atomo e conoscenza umana*. Boringhieri, 1914 - 1961, S. 106 e sgg

## Bibliografia

- [Bohr 1965] BOHR, Niels ; GULMANELLI, Paolo (edit.): *I quanti e la vita*. Boringhieri, Settembre 1965 (Universale scientifica Boringhieri). – 236 S
- [Boyer 1975] BOYER, Timothy H.: Random electrodynamics: The theory of classical electrodynamics with classical electromagnetic zero-point radiation. In: *Physical Review D* 11 (1975), Nr. 4, S. 790
- [Cassidy 1996] CASSIDY, David C. ; L., Sosio (edit.): *Un'estrema solitudine. La vita e l'opera di Werner Heisenberg*. Bollati Boringhieri, 1996. – 730 S. – ISBN 8833910113
- [Ciccotti e Donini 1976] CICCOTTI, Giovanni ; DONINI, Elisabetta: Sviluppo e crisi del meccanicismo: da Boltzmann a Planck. In: *L'ape e l'architetto*. Feltrinelli, 1976
- [Heisenberg et al. 1959] HEISENBERG, Werner ; SCHRODINGER, Erwin ; BORN, Max ; AUGER, Paul: *Discussione sulla fisica moderna*. Editore Boringhieri, 1959 (Edizioni scientifiche Einaudi). – 131 S
- [Maffei 1980] MAFFEI, Massimiliano: *Aspetti della politica della scienza in Germania 1915-1925*. prima. U.C.T., Marzo 1980. – 337 S
- [Petruccioli 1976] PETRUCCIOLI, Sandro: Il Principio di Corrispondenza: Il contributo di Bohr alla fondazione della meccanica delle matrici. In: *Contributi alla storia della meccanica quantistica* Bd. 7. Domus Galilaeana, 1976
- [Rossi 1977] ROSSI, Arcangelo: Epistemologia e prassi scientifica. In: *Sapere* 797 (1977), S. 31–35
- [Van der Waerden 1967] VAN DER WAERDEN, B.L.: *Sources of Quantum Mechanics*. North Holland Publishing Company, 1967