

IL NUOVO SAGGIATORE

BOLLETTINO DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

Direttore Responsabile
Renato Angelo Ricci

Direttori Esecutivi
Antonio Bertin, Pio Picchi,
Andrea Taroni e Antonio Vitale

- 3 EDITORIALE
COMO: CONGRESSO DEL CENTENARIO
di Renato Angelo Ricci
- 5 NUCLEI CALDI E MULTIFRAMMENTAZIONE:
QUALCHE ASPETTO DEL COMPLESSO MONDO
DELLE REAZIONI NUCLEARI CON IONI PESANTI
di Arialdo Moroni
- 22 SULLE TRACCE DEL VUOTO
di Giuliano Preparata
- 31 ASPETTI UNIVERSALI DEL DISORDINE STRUT-
TURALE IN NATURA
di H. Eduardo Roman e Armin Bunde
- 49 PROGETTO E REALIZZAZIONE DI UN PROCESSO
PER IL TRATTAMENTO DI RIFIUTI NOCIVI ME-
DIANTE TECNOLOGIA AL PLASMA
di R. Florio, R. Benocci, M. Paolicchio, A. Galassi, M. Pi-
selli, M. Seiascia, S. Latorre, L. Radice, E. Sindoni e
G. Zambon
- 63 RECENSIONI
- 66 SCELTI PER VOI - Il compagno lagrangiano della Ter-
ra - L'acqua - Il tramonto della civiltà minoica

- (10) R. BOGHOLT, F. GILMINELLI, F. SCHUSSLER: *Annales de Ganiil*, 58 (1996).
 (11) W. BAUER *et al.*: *Phys. Rev. Lett.*, 69, 1888 (1992).
 (12) P.J. SIEMENS: *Nucl. Phys. A*, 428, 189e (1984).
 (13) H.E. STANLEY: *Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena* (Oxford University Press, 1971).
 (14) G. SAUER *et al.*: *Nucl. Phys. A*, 264, 221 (1976).
 (15) D. STAUFFER and A. AHARONY: *Introduction to Percolation Theory* (Taylor and Francis, 1992).
 (16) S. COSTA, S. ALBERGO, A. INSOLIA, C. TUVE (Editors): *CRIS '96: Critical Phenomena and Collective Observables*, (World Scientific, 1996).
 (17) E. SURAUD: *XXVIII International Winter Meeting on Nuclear Physics*, edited by I. Iori, *Ric. Sc. ed Educ. Perm.*, suppl. 78 (Università di Milano, 1990), pag. 190.
 (18) I. IORI (Editor): *XXXIV International Winter Meeting on Nuclear Physics*, *Ric. Sc. ed Educ. Perm.*, suppl. 106 (Università di Milano, 1996).
 (19) J. GLEICK: *Chaos* (Rizzoli, 1989).

Arialdo Moroni, Primo Ricercatore presso la Sezione di Milano dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, si è principalmente dedicato allo studio dei meccanismi di reazione tra nuclei pesanti, in particolare progettando l'apparato MULTICS e come Responsabile della Collaborazione che ha utilizzato quest'apparato in esperimenti a GANIL (Caen, Francia) e al Laboratorio Ciclotrone della Michigan State University (U.S.A.). Attualmente è coresponsabile della Collaborazione OUVERTURE, impegnata in ricerche ad ampio raggio presso il Laboratorio Nazionale del Sud traendo vantaggio dall'uso congiunto di vari apparati.

22

SULLE TRACCE DEL VUOTO

Giuliano Preparata

Dipartimento di Fisica

Università di Milano

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Sezione di Milano

I. - Introduzione

Nella fisica classica (per intenderci quella di Galilei, Cartesio e Newton) il vuoto, lo spazio-tempo privo di qualsiasi traccia di materia, è una nozione puramente negativa, vestigio post-aristotelico dell'*horror vacui* che percorre e informa il mondo della scienza antica. Nell'Universo della scienza post-medievale il suo «non essere» è solo il punto di partenza da cui, mediante l'atto della creazione saldamente legata ad un'entità trascendente, si evolve la grande vicenda della Natura. Co-

me la creazione anche il vuoto appartiene al mondo della metafisica, estraneo e separato da quello della fisica.

Con l'avvento della meccanica quantistica (MQ) nei primi decenni del secolo che si sta chiudendo, la visione del mondo fisico cambia, come è noto, drasticamente. All'*horror vacui* si sostituisce lo strano e bizzarro *horror quietis* radicato nel principio di indeterminazione di Heisenberg. La materia (e non solo essa) sottratta alla decomposizione in strutture puntiformi — gli atomi — retti dalle leggi matematiche della dinamica di Newton, Lagrange, Hamilton, acquista ora, per opera di Heisenberg, Born e Jordan, caratteristiche che la fisica classica assegnava soltanto a sistemi ondulatori: modelli di sistemi materiali in cui l'aspetto atomistico soltanto per convenienza descrittiva veniva risolto in un continuo con un numero infinito di gradi di libertà meccanici, capace quindi di comportamenti dinamici collettivi, le onde appunto, del tutto diversi dalle ben distinte traiettorie classiche dei punti materiali. Tuttavia nella MQ il passaggio dal mondo dei punti materiali all'universo dei sistemi continui, i campi (luoghi dello spazio-tempo in cui si instaura una «situazione» fisica particolare, avvertibile mediante la variazione del comportamento di opportuni corpi-sonda), resta, per opera di personalità dell'influenza di Niels Bohr, sospeso a mezz'aria, generando nozioni paradossali come il dualismo «onda-corpuscolo», che avrà una parte così importante nell'interminabile dibattito sui fondamenti della MQ, dibattito che ha origine con la famosa sfida fra Einstein e Bohr alla fine degli anni '20, e che purtroppo resta tuttora insoluto¹.

Se dunque compiamo tutt'intero il salto alla nuova visione dell'Universo, che si fonda sulla teoria quantistica dei campi (TQC), scopriamo che l'*horror quietis* scaccia l'antico, classico *horror vacui*, e nell'architettura dell'Universo il vuoto viene ad assumere un ruolo cruciale. La strada verso questa scoperta, almeno concettualmente, non è affatto impervia: parte dalla considerazione che un campo

¹ In un saggio recente: *What is Quantum Physics? Back to Planck, Einstein and Nernst*, cerco di argomentare che la fisica dei quanti può superare i vari paradossi della MQ e riappropriarsi pienamente del realismo forte galileiano solo in termini di campi quantistici, nell'ambito cioè della teoria quantistica dei campi (TQC).

quantistico non è altro che l'insieme (infinito) dei suoi modi ondulatori (le onde piane del campo elettromagnetico, ad esempio) e prosegue con la «quantizzazione» di questi modi, che sono formalmente riconducibili ad oscillatori, il cui impulso e la cui deviazione dal punto di equilibrio non possono ambedue annullarsi, come legifera il principio di Heisenberg. Se quest'ultima possibilità fosse realizzabile, il vuoto tornerebbe nell'angolo metafisico che gli assegna la fisica classica; invece il «moto di punto zero» che necessariamente agita i modi-oscillatori (i cosiddetti «oscillatori d'etere») priva il vuoto, lo stato quantistico di minima energia (o *ground state*, GS), della sua «non-entità» classica assegnandogli il ruolo di determinante punto di partenza di ogni evoluzione dinamica di materia ed energia. E ciò al di qua della creazione, che nell'ordine metafisico dell'Universo è responsabile anche dell'esistenza del vuoto.

Paradossalmente e stranamente, nonostante la posizione centrale che la determinazione della struttura del vuoto (o GS) occupa nella TQC, nello sviluppo che questa ha avuto negli ultimi cinquant'anni, il GS ha ricevuto più o meno la stessa attenzione che nella fisica classica: nozione data *a priori*, piuttosto che conseguenza e risultato di un problema dinamico univocamente definito. Infatti la dinamica dei quanti non è, come la dinamica classica, determinata da opportune condizioni iniziali (problema di Cauchy, Neumann, Dirichlet ecc.) ma dalla struttura del GS, e quindi del vuoto, cui un sistema aperto che fluttua (tale è infatti un sistema quantistico) tende immaneabilmente con lo scorrere del tempo.

Può sembrare paradossale, ma la fisica dei quanti attraverso le sue fluttuazioni intrinseche evita il comportamento caotico della meccanica classica, oggi di gran moda. Infatti, a differenza del mondo classico, l'universo quantistico con lo scorrere del tempo converge verso il vuoto, indipendentemente dallo stato (eccitato) in cui si trovi nell'istante iniziale. Tuttavia, la complessità del problema generale della determinazione del vuoto, unita ai grandi successi dell'elettrodinamica quantistica (QED, *quantum electro dynamics*) di Feynman, Schwinger e Tomonaga nei primi anni del dopoguerra, hanno favorito il radicamento di un paradigma solidissimo che postula per il vuoto la struttura più semplice compatibile con il principio di Heisen-

berg. Questo paradigma riempie il vuoto perturbativo (PGS, *perturbative ground state*), soltanto di modi/oscillatori che oscillano incoerentemente nello stato di minima energia («punto zero»).

La possibilità che questi oscillatori comunichino gli uni con gli altri attraverso le forti «non linearità» della TQC e, così facendo, possano esplorare, fluttuando, configurazioni coerenti di minore energia, e quindi accedere al GS, viene scartata *a priori*, postulando soltanto modificazioni piccole (perturbative, appunto) dalla configurazione più semplice. Evidentemente nel caso di QED questa determinazione aprioristica del vuoto (il vuoto perturbativo) non fa alcuna violenza alla teoria (lo dimostra l'eccezionale accuratezza dei calcoli di QED in sistemi di cariche altamente diluite): il vero vuoto può determinarsi con precisione crescente mediante le approssimazioni successive (espansione in un parametro piccolo, la costante di struttura fine $\alpha = 1/137$) della teoria perturbativa (TP). In tal modo il paradigma si incardina nell'equazione

$$TQC = TP.$$

Questo è il mondo teorico con cui nella metà degli anni sessanta, appena laureato in fisica teorica, vengo a contatto. Esaurita la stagione pionieristica di QED, i problemi che in quel periodo assorbono la fisica delle particelle riguardano le interazioni fra le nuove particelle (gli adroni, fra cui figurano i ben noti protone e neutrone) le cosiddette interazioni forti, e quelle fra gli adroni e i leptoni (elettroni, muoni e neutrini) le interazioni deboli. Nuove TQC vengono proposte, come la *quantum chromo dynamics* (QCD) che dagli inizi degli anni settanta domina il mondo degli adroni: la teoria di campo che descrive le interazioni fra gli elusivi quark e gli altrettanto elusivi gluoni, che dovrebbero generare gli adroni, stati composti di quark e gluoni. Il «copione» c'è già, quello degli atomi, composti di nuclei atomici e di elettroni legati ai nuclei dalla interazione elettrostatica di QED: la ben nota forza coulombiana. Ma c'è una differenza che appare ben presto cruciale: mediante opportune perturbazioni, con cui si trasferiscono adeguate quantità di energia, gli atomi possono disaggregarsi nei costituenti: protoni, neutroni e elettroni. Per gli adroni, nonostante sia stato tentato ogni

mezzo disponibile (inclusi gli acceleratori più potenti), non li si è mai riusciti a decomporre nei loro quark e gluoni costituenti, talché è pressoché universale la convinzione che ciò non sia possibile: che i quark e i gluoni siano permanentemente «confinati» all'interno degli adroni. «Confinati»: ma che vuol dire? come si concilia questa nozione essenzialmente nominalistica con il vuoto perturbativo, in cui i quanti dei campi fondamentali di QCD, quark e gluoni, scorrazzano quasi liberi in lungo e in largo?

È da queste considerazioni che all'inizio degli anni sessanta inizia per me un lungo viaggio sulle tracce del vuoto, che mi accingo a raccontare.

2. - Il Vuoto di QCD

Il totale insuccesso di una caccia decennale ai quark, iniziata subito dopo che il modello a quark, a metà degli anni '60, aveva indicato la loro grande rilevanza nella costruzione dell'universo degli adroni, aveva convinto la maggior parte dei fisici delle particelle che questi dovessero obbedire a leggi dinamiche del tutto nuove. Tuttavia il modello standard (MS) che all'inizio degli anni '70 aveva già ricevuto la sua forma attuale, costruita sulla nozione di teoria di gauge (GT)², a livello di campi quantistici fondamentali non fa alcuna distinzione fra i quark (e i gluoni) «confinati» e i leptoni (e i fotoni) ben visibili e presenti negli strumenti della fisica delle particelle: la forma delle leggi dinamiche cui obbediscono quark e leptoni è (o almeno appare) essenzialmente identica. E se il paradigma è fondato, e il vuoto è dato *a priori* (è, cioè, quello perturbativo) non c'è alcuno spazio per una nozione come quella del «confinamento»: non c'è infatti alcuna differenza sostanziale fra quark e gluoni ed elettroni e fotoni. La soluzione di questo paradosso, me ne resi conto subito dopo il consolidamento della struttura teorica del MS, non poteva fondarsi che sull'abbandono del paradigma e sulla comprensione della dinamica del vuoto di QCD. Una dinamica che doveva essere del tutto nuova,

diversa da quella antica e familiare del vuoto di QED (il vuoto perturbativo) nei sistemi a bassa densità di carica. Tuttavia la scoperta nel 1973 della libertà asintotica (*Asymptotic Freedom*, AF) da parte di Politzer, Gross e Wilczek⁽¹⁾ rivitalizzò inaspettatamente il paradigma. L'AF si basa sul fatto che la costante di accoppiamento di QCD a scale spazio-temporali molto piccole diventa molto piccola, annullandosi asintoticamente. Questo comportamento, la cui validità è stata dimostrata solo nella teoria perturbativa, può ben valere al di là del limite perturbativo, congettura questa cui sembra possibile attribuire una certa ragionevolezza. Tuttavia l'implicazione generalmente accettata che si possano calcolare i comportamenti di corte distanze (la fisica altamente inelastica) mediante la TP mi apparve subito del tutto irragionevole: urtava contro la mia percezione della realtà fisica, incapace di concepire in che modo e a che distanze spazio-temporali i quark quasi liberi della TP subissero la metamorfosi dell'«adronizzazione», si tramutassero cioè in adroni privi della carica di colore.

Tecnicamente, quindi, l'AF poneva due domande fondamentali cui occorreva dare una risposta:

- i) Qual'è la scala spazio-temporale (o, equivalentemente, quella energetica, detta Λ_{QCD}) oltre la quale la TP cessa di essere applicabile?
- ii) Pur ammettendo che, come suggerito dagli esperimenti, tale scala sia sorprendentemente piccola ($\Lambda_{\text{QCD}} \approx 100-200 \text{ MeV}$), è poi vero che da

$$g(\mu) \rightarrow 0, \quad \mu \gg \Lambda_{\text{QCD}}$$

discende

$$\text{QCD} \rightarrow \text{P(erturbative) QCD?}$$

Come ho scoperto nella prima metà degli anni '80⁽²⁾, le due domande non sono affatto indipendenti, e la risposta ad entrambe è tale da rendere la QCD basata su AF, che è oggi generalmente accettata (GAQCD, *generally accepted* QCD), del tutto priva di fondamento.

Un'affermazione così radicale (e incomprensibilmente ignorata dalla maggioranza dei fisici teorici delle particelle) si basa su un calcolo variazionale molto complesso e difficile⁽²⁾, corroborato poi da una serie di simulazioni sul reticolo⁽³⁾, che dimostra che

² Anche QED è una teoria di gauge, ma di un tipo particolarmente semplice, è una teoria «abeliana» in cui il campo di gauge, il campo elettromagnetico, non è portatore di alcuna carica.

a) $\Lambda_{\text{QCD}} \approx 10^{-3} - 10^{-2} m_p$ dove (m_p è la cosiddetta massa di Planck $\approx 10^{19}$ GeV);

b) Il GS di PQCD è «essenzialmente instabile», cioè devia in modo drammatico dal vero GS di QCD fino a scale dell'ordine di $\Lambda_{\text{QCD}} \approx m_p$.

Inoltre questa analisi porta a concludere che (4):

i) il (probabile) vuoto di QCD è un liquido cromomagnetico (CML, *chromomagnetic liquid*) composto di «domini di Weiss» aghiformi ed in rotazione in cui si condensa un elevatissimo campo cromomagnetico ($gB \approx \Lambda_{\text{QCD}}^2$);

ii) nel CML le uniche eccitazioni di energia molto minore di Λ_{QCD} — gli adroni — hanno la caratteristica di essere invarianti per trasformazioni del gruppo di colore.

iii) l'interazione effettiva fra quark e gluoni consta di un termine a lungo range (il «potenziale lineare»)

$$V \approx \mu^2 r \quad (\mu \text{ è chiamata la «string tension»})$$

e di termini piccoli (perturbativi) efficaci a distanze $d \leq 1/\mu$, recuperando così in parte la fenomenologia generalmente fondata su AF;

iv) lo spettro degli adroni (mesoni e barioni) può essere calcolato a partire da un numero di «input» minimo: le masse dei quark e la «string tension» μ (5) con risultati molto lusinghieri;

v) la fisica delle alte energie, sia a piccolo che a grande trasferimento di impulso si può calcolare abbastanza agevolmente con buoni risultati (6).

In conclusione un'analisi del vuoto di QCD, che non parte dall'Ansatz perturbativo, ma cerca con metodi non-perturbativi (calcolo variazionale, calcolo sul reticolo) configurazioni dei campi quantistici completamente diverse da quelle perturbative, ci ha portato a riconoscere il ruolo fondamentale del campo cromomagnetico nel ridurre drasticamente la densità di energia del vuoto perturbativo. In questi nuovi stati (di cui non si può dire con certezza che realizzino il vero GS di QCD, ma soltanto che stanno al di sotto di quello perturbativo, rendendo pertanto quest'ultimo «essenzialmente instabile»), i quark e i gluoni, e qualsiasi loro combinazione la cui carica di colore sia diversa da zero, hanno un'energia enorme, mentre gli unici stati di bassa energia sono combinazioni di quark e gluoni senza alcuna carica di colore, gli adroni appunto. Abbiamo così nella strut-

tura a domini magnetici del (probabile) vuoto di QCD non solo una spiegazione della paradossale (e aristotelica) nozione del «Confinamento» ma anche una base semplice e trasparente della dinamica degli adroni.

3. — Il vuoto di QED nella materia condensata

I trionfi dell'elettrodinamica quantistica e delle «correzioni radiative» alla fine della seconda guerra mondiale, dimostrano che per sistemi assai diluiti di cariche (densità $N/V \ll 10^{23} \text{ cm}^{-3}$, un tipico valore della materia condensata) il vuoto perturbativo è una ottima approssimazione al vuoto di QED.

La domanda che è lecito e doveroso porsi è dunque:

le equazioni

$$\text{GS} \sim \text{PGS}$$

$$\text{QED} \sim \text{P(erturbative) QED}$$

rimangono vere anche quando la densità delle cariche cresce verso i valori della materia condensata? A quanto pare quasi tutti hanno ignorato (e io fra essi fino al 1992) che una risposta negativa a questa domanda era stata già data nel 1973 da due noti e autorevoli fisici matematici, K. Hepp e E. Lieb, che in una serie di lavori (7) dimostrarono che nel modello di Dicke (N atomi a due livelli accoppiati in modo risonante ad un singolo modo del campo elettromagnetico, il modello «principe» della fisica del Laser) al di sotto di una certa temperatura (T_c) e al di sopra di una certa densità (ρ_c), il PGS di QED subisce una transizione di fase, la «transizione di fase superradiante» (SPT, *superradiant phase transition*) ad uno stato coerente di materia e campo, del tipo di quello che si instaura nel laser, con la differenza fondamentale che ciò avviene *spontaneamente!* Non c'è dunque alcun bisogno né della cavità ottica, né della pompa energetica senza cui l'ormai familiare laser non può funzionare.

La ragione di una tale incredibile e generalizzata indifferenza ad un risultato così nuovo e rivoluzionario può farsi risalire ad una serie di lavori, apparsi nella seconda metà degli anni '70, che pretendevano di dimostrare l'irrelevanza della SPT di Hepp e Lieb con la presunta «noninvarianza di gauge» dell'Hamiltoniana di Dicke. La fallacia di questi argomenti fu

esplicitamente dimostrata dal mio gruppo nel 1994⁽⁸⁾; tuttavia la meraviglia rimane che una «perla» scientifica di questa bellezza sia stata sepolta da un tale pantano teorico, sì da richiamare alla mente il famoso detto latino.

Ma quando venni a conoscenza del lavoro di Hepp e Lieb ero ormai da almeno cinque anni impegnato in un programma di ricerca sul GS di QED nella materia condensata, la cui origine è negli studi di TQC che mi avevano condotto, alcuni anni prima, alla scoperta del (probabile) vuoto di QCD. Con la collaborazione di Emilio Del Giudice e di vari dottorandi e laureandi dell'Università di Milano questo programma ha fatto rapidi progressi, una parte dei quali è raccolta in un libro pubblicato nell'estate del 1995 dalla casa editrice World Scientific, dal titolo «*QED Coherence in Matter*»⁽⁹⁾.

Da questi studi e risultati sta emergendo una nuova descrizione della materia condensata, che rimpiazza il **Meccano Elettrostatico**, la visione generalmente accettata basata sulle forze elettrostatiche e quindi di corta portata, con una sorta di **Network Elettrodinamico**, in cui i componenti elementari della materia, atomi e molecole, sono coinvolti in un moto collettivo, simile appunto al moto degli atomi di un laser, in fase con un campo elettromagnetico coerente (classico) dalle caratteristiche molto particolari, che lo intrappolano all'interno del sistema di atomi.

Questi stati «coerenti» di campo elettromagnetico e materia (che acquista ora pienamente e unicamente la natura ondulatoria che gli attribuisce la fisica dei quanti) nella nuova visione realizzano i minimi di energia che conferiscono alla materia condensata (liquida e solida) l'enorme stabilità e varietà, che ci sono così familiari. In tal modo un gran numero di fatti e di problemi, dalla superconduttività al ferromagnetismo, dalla superfluidità alla fusione fredda, alla fisica dell'acqua e via dicendo, in cui la materia condensata mostra un incredibile grado di ordine su scale macroscopiche, trovano finalmente una base razionale che nella visione convenzionale è oscurata dall'insostenibile aspettativa che le forze elettrostatiche di corta portata (che quindi coinvolgono gli atomi e le molecole soltanto a due a due) possano organizzarsi in modo da dare origine, come nei cristalli, a strutture ordinate cui partecipano simultaneamente centinaia di miliardi di oggetti elementari.

Il libro citato più sopra contiene una rassegna delle prime applicazioni della nuova teoria della materia condensata che mettono in evidenza il fatto che innumerevoli, affascinanti proprietà di quest'ultima riflettono altrettanti aspetti dei «vuoti» (non-perturbativi) di QED in sistemi densi di atomi e molecole.

4. - Il vuoto della materia nucleare

Il secolo che sta per finire si aprì, come è noto, con la scoperta da parte di Rutherford del nucleo atomico. Ci vollero però circa trent'anni per riconoscere che il cuore degli atomi non era altro che un aggregato di particelle «elementari» fortemente interagenti, protoni (i nuclei dell'idrogeno) e neutroni (scoperti da Chadwick nel 1932). Dagli anni '30, quindi, i fisici si sono dovuti confrontare con un nuovo tipo di materia, la materia nucleare, che obbedisce a leggi del tutto nuove, quelle del mondo adronico. E la scoperta delle stelle di neutroni, le famose Pulsar, nella metà degli anni '60, confermò la previsione che sotto l'effetto degli enormi campi gravitazionali che si generano quando una stella muore e si contrae, un insieme macroscopico di neutroni può condensarsi alle enormi densità del nucleo atomico dando luogo ad un «nucleo gigante» del raggio non più di 10^{-12} cm ma di qualche chilometro.

Cosa tiene insieme i nucleoni (così si chiamano, collettivamente, protone e neutrone) nel nucleo atomico? Il problema delle forze nucleari è per molti versi simile a quello delle forze che tengono insieme atomi e molecole in un pezzo di materia condensata. Come si è visto nella sezione precedente, la congettura di una natura puramente elettrostatica di queste ultime cozza contro un gran numero di fatti e contro l'esistenza di «vuoti» di QED diversi e di minore (densità di) energia di quello perturbativo. Nel caso delle forze nucleari la visione generalmente accettata, che si basa su forze «nucleostatiche» di cortissimo range ($\sim 1 \text{ fm} = 10^{-13} \text{ cm}$) dovute allo «scambio» non di fotoni bensì di mesoni π (ipotizzati dal giapponese H. Yukawa nel 1935, e scoperti nel 1947) e di altri mesoni più pesanti, porterebbe a predire per il nucleo una struttura simile a quella ipotizzata per l'atomo da J.J. Thomson e falsificata, appunto, da Rutherford: una sorta di palla di gela-

