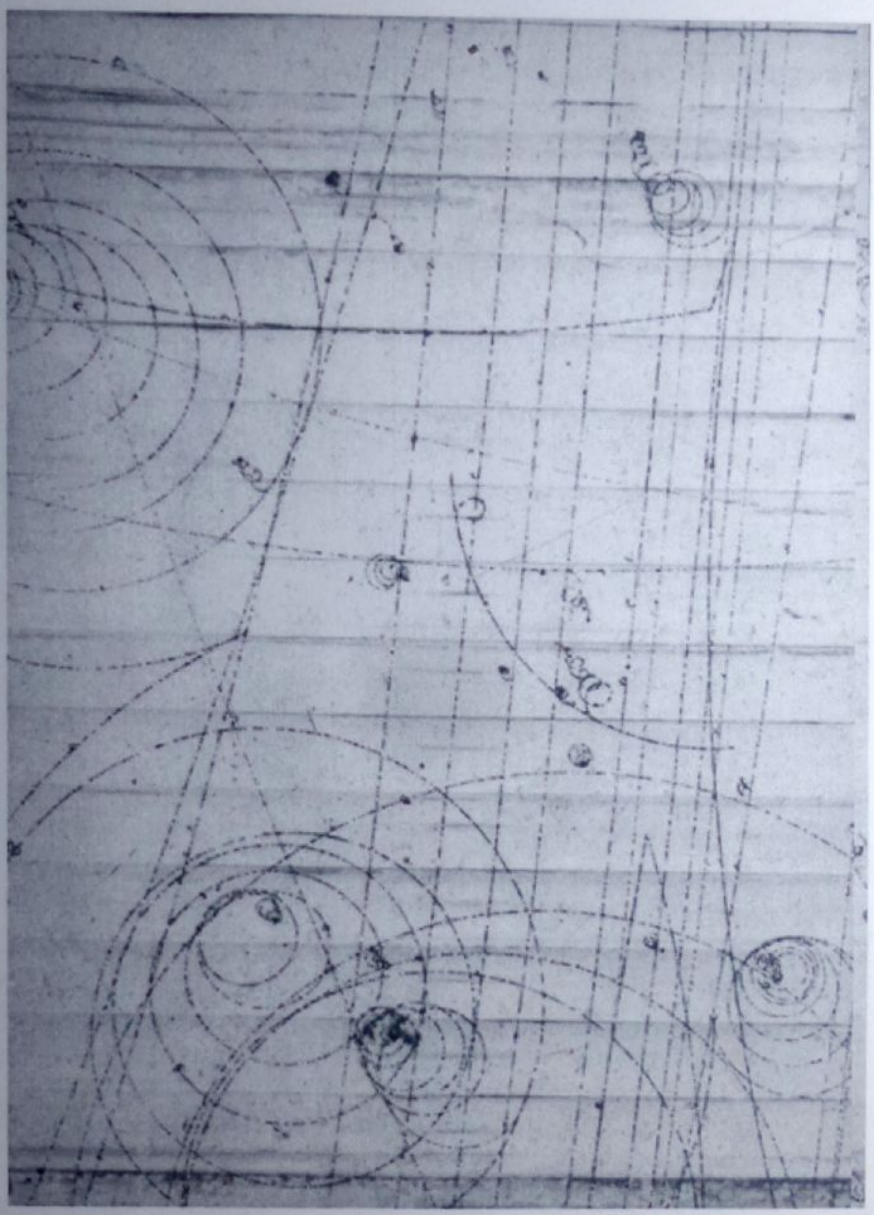
هستی شناسی نظریه میدان کوانتومی



Scanned by CamScanner

نظریه میدان کوانتومی راجع به چه موجودی سخن می‌گوید؟

" ... I want to emphasize that light comes in this form, particles. It is very important to know that light behaves like particles, especially for those of you have gone to school, where you probably learned something about light behaving like waves. I'm telling you the way it does behave, like particles.

... It's rather interesting to note that electrons looked like particles at first, and their wavish character was later discovered. On the other hand, apart for Newton making a mistake and thinking that light was 'corpuscular', light looked like waves at first, ant its characteristics as a particle were discovered later. In fact, both objects behave somewhat like waves and somewhat like particle. In order to save ourselves from inventing new words such as 'wavicles', we have chosen to call these objects 'particles', but we all know that they obey these rules for drawing and combining arrows that I have been explaining. It appears that all the 'particles' in nature, quarks, gluons, neutrinos, and so forth, behave in this quantum mechanical way."

Richard Feynman,
QED: The strange theory of light and matter, 1986.

" ... It is widely believed that it is impossible to reconcile quantum mechanics and relativity, except in the context of a quantum field theory. A quantum field theory is a theory in which the fundamental ingredients are fields rather than particles; the particles are little bundles of energy in the field."

Steven Weinberg,
Elementary Particles and the Laws of Physics, The 1986 Dirac Memorial Lectures, 1987.

Scanned by CamScanner

* تشتت آرای فیزیکدانان :

- دیراک ، هایزنبرگ پیر ، نایمن ، ویلر ← ذره
- پائولی ، هایزنبرگ جوان ، توموناگا ، شرودینگر ← میدان

- ذره کلاسیک :
  - تشخص ← هویت / شمارش پذیری
  - جایگزیدگی

- میدان کلاسیک :
  - تنوع
  - ناجایگزیدگی

- میدان کوانتومی چیست ؟
  - ذره ؟
  - میدان ؟
  - دوگانه موری ؟

Scanned by CamScanner

* اصول نظریه کوانتومی در تعبیر مرسوم آن :

- واقعیت کوانتومی : نظر = اعلام + خلق $|\alpha\rangle$

- حوادث کوانتومی : رابطه بین نظرها $\langle\alpha|\beta\rangle$

- مشاهده کوانتومی : منظورها + تقلیل حالت $|a_n\rangle$

- تقارنهای کوانتومی : موتور محرکه ریاضیات نظریه

• انواع هستی شناسی ها : - هستی شناسی مرسوم
- هستی شناسی مایمن
⋮

• واقعیت کوانتومی با مسامحه ← نظر فقط در اعراض ← مکانیک کوانتومی

• واقعیت کوانتومی تام ← نظر در اعراض و ذات ← نظریه میدان کوانتومی

• رابطه بین حوادث کوانتومی و مفهوم ذره :

- ذره کلاسیک : ذره اکنون اینجاست ، بعداً آنجاست .
- ذره کوانتومی : ذره اکنون در اینجا خلق شد ، بعداً ذره‌ای در آنجا خلق می‌شود .
در این میان دستگاه کوانتومی وجود دارد .

• رابطه بین مشاهده کوانتومی و مفهوم ذره :

- مشاهده پذیر بودن مکان؟ ≡ آیا مکان منظور نظر است؟
- مشاهده پذیر بودن زمان؟ ≡ آیا زمان منظور نظر است؟

Scanned by CamScanner

• تعبیر نایمن از واقعیت + حوادث + مشاهده کوانتومی :

جمع امکانات = هستی شناسی ذرات مجنون

• آیا ذرات مجنون نایمن ذره‌اند؟

- تشخص دارند در هنگام نظر
- جایگزیده‌اند در هنگام نظر
- مجنونند (نه تشخص دارند و نه جایگزیدن) و لیکن منظور نظر نیستند.

• تعارضهای کوانتومی :

الف) تعارض گالیله + تعارضهای پیمانه‌ای

ب) تعارض پوآنکاره + تعارضهای پیمانه‌ای

ج) تعارض عام + تعارضهای پیمانه‌ای

• اگر هیچ ناظری به ذره بودن یا میدان بودن نظر نکند چه؟

- به نظر میرسد همیشه این موضوع منظور نظر است.

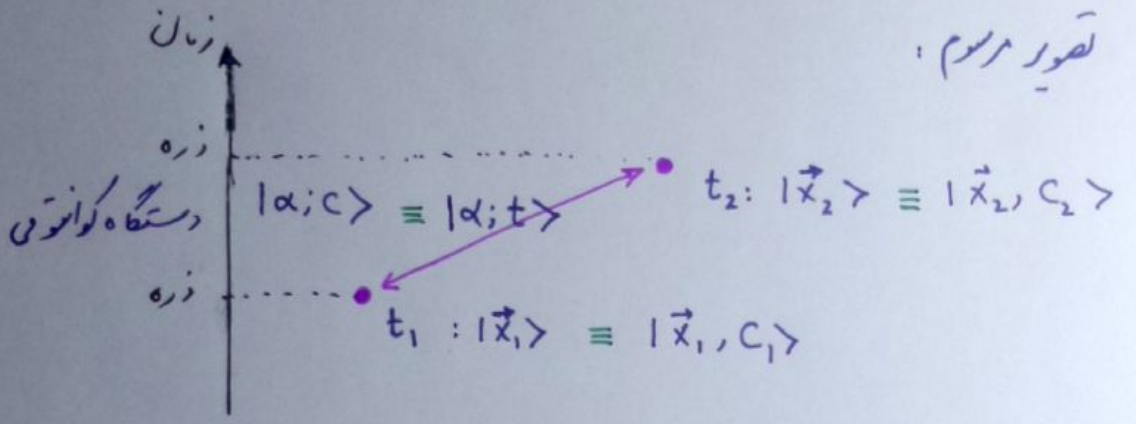
Scanned by CamScanner

الف ـ ۱ : تقارن گالیله + واقعیت کوانتومی با مسامحه ← مکانیک کوانتومی غیر نسبیتی

• زمان متطور نظر نیست بنا به دلایل تکنیکی ← مشاهده پذیر ساعت

• مکان متطور نظر است : $\int d^3x \; |\vec{x};NR\rangle\langle\vec{x};NR| = \hat{1}$

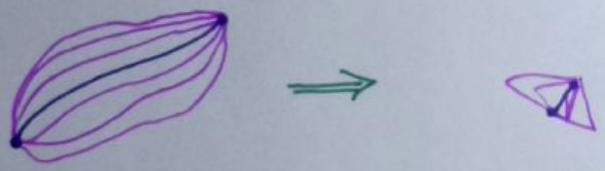
تصویر مرسوم :



تصویر ذرات مجنون : $\langle\vec{x}_1|e^{-iHt/\hbar}|\vec{x}_2\rangle \longrightarrow \int Dx\, e^{iS/\hbar}$

$\downarrow$

$e^{-iEt/\hbar}\; e^{i\vec{p}\cdot\vec{x}/\hbar}$



مسیر کلاسیک مستقیم : $\frac{\partial(S/\hbar)}{\partial p_i} = 0 \Rightarrow \vec{p} = m\frac{\vec{x}}{t}$: نماز پایدار

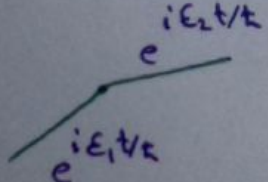
$\Downarrow$

$S/\hbar = \varepsilon t \Rightarrow \int Dx\, e^{is/\hbar} \sim e^{+i\varepsilon t/\hbar}$

برای بسته موج : $\langle G_1(\vec{x}_1)|e^{-iHt/\hbar}|G_2(\vec{x}_2)\rangle \sim e^{-i\varepsilon t/\hbar}$

• ذرات مجنون ← تشخص و جایگزیدگی هنگام نظر

$e^{+i\varepsilon t/\hbar}$ در غیر اینصورت ← هرچه میخواهند میکنند با ضریب ساعت



• نقش تقارن پیمانه‌ای ← برهمکنش

Scanned by CamScanner

الف-۲ : تقارن گالیله + واقعیت کوانتومی تام ← نظریه میدان کوانتومی غیرنسبیتی

* هستی‌شناسی ذرات مجزا :

- زمان متطور نظریست بنا بدلایل تکنیکی ← مشاهده‌پذیر ساعت

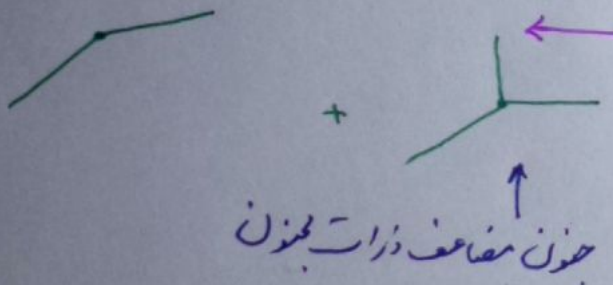
$$\int d^3x \, |\vec{x}; NR\rangle \langle \vec{x}; NR| = \mathbb{1}_{1\text{-particle}}$$: موقعیت متطور نظراست

$$\sum_n |n\rangle\langle n| = \mathbb{1}_{\text{number}}$$: تعداد ذرات متطور نظراست

• تشخص ← تشخص‌پذیر نا‌پذیر !!!

... the possibility that one of the identical twins Mike and Ike is in the quantum state E1 and the other in the quantum state E2 does not include two differentiable cases which are permuted on permuting Mike and Ike; it is impossible for either of these individuals to retain his identity so that one of them will always be able to say 'I'm Mike' and the other 'I'm Ike.' Even in principle one cannot demand an alibi of an electron! (Weyl 1931)

• تقارن بیمانه‌ای ← برهمنش



جون مضاعف ذرات مجزا

* هستی‌شناسی میدانی :

$$\hat{\phi}(\vec{x})|0\rangle = |\vec{x}; NR\rangle$$ - معرفی میدان به‌عنوان خلاق ذره از خلاء

• تشخص ذره‌ای ← تنوع میدانی

• جایگزیدگی هنگام نظر ← عدم جایگزیدگی

- عدم لزوم معرفی میدان در حالت غیرنسبیتی

Scanned by CamScanner

ب-۱ تقارن پوآنکاره + واقعیت کوانتومی با مسامحه ← مکانیک کوانتومی نسبیتی

- زمان منظور نظر نیست بنا بدلایل تکنیکی ← مشاهده پذیر ساعت

- مکان ← منظور نظر نیست تا تقارن پوآنکاره به صراحت دیده شود. ×
  ← اصرار بر منظور نظر بودن مکان

• حالات اندازه حرکت خوش تعریفند:

$$U(\Lambda)|\vec{P},m\rangle = |\Lambda\vec{P},m\rangle$$

$$|\vec{P},m\rangle \equiv |P_\mu\rangle$$

- کامل بودن
$$\mathbb{1}_{1\text{-particle}} = \int \frac{d^3P}{(2\pi\hbar)^3}\frac{1}{2E_P}|\vec{P}\rangle\langle\vec{P}|$$

- تعامد
$$\langle\vec{P}|\vec{P}'\rangle = (2\pi\hbar)^3 2E_P \delta(\vec{P}-\vec{P}')$$

- مولد انتقال بودن
$$\langle\vec{x}|\vec{P}\rangle = e^{i\vec{P}\cdot\vec{x}/\hbar}$$

• سؤال: دیتره حالت موقعیت چیست؟

$$|\vec{x}\rangle = \mathbb{1}_{1\text{-particle}}|\vec{x}\rangle = \int \frac{d^3P}{(2\pi\hbar)^3}\frac{1}{2E_P}e^{-i\vec{P}\cdot\vec{x}/\hbar}|\vec{P}\rangle$$

$$\Downarrow$$

$$\int d^3x\, |\vec{x}\rangle\langle\vec{x}| = \int \frac{d^3P}{(2\pi\hbar)^3}\frac{1}{(2E_P)^2}|\vec{P}\rangle\langle\vec{P}| \neq \mathbb{1} \quad !!!$$

* ذره می‌تواند در جایی غیر از جرمی باشد!!

$$\langle\vec{x}|\vec{x}'\rangle = \int \frac{d^3P}{(2\pi\hbar)^3}\frac{1}{2E_P}e^{i\vec{P}\cdot(\vec{x}-\vec{x}')/\hbar} \neq \delta(\vec{x}-\vec{x}') \quad !!!$$

* ذره جایگزیده در $\vec{x}$، در $\vec{x}$ جایگزیده نیست!!

$|\vec{x},R\rangle$ ← نه کامل است و نه متعامد

Scanned by CamScanner

• سؤال: آیا می‌توان موقعیت کامل و متقارن تعریف کرد؟

• موقعیت نیوتون - ویگنر:

$$|\vec{x};NW\rangle = \int \frac{d^3p}{(2\pi\hbar)^3} f(\vec{p})\, e^{-i\vec{p}\cdot\vec{x}/\hbar} |\vec{p}\rangle$$

$$\Downarrow$$

$$\int d^3x\ |\vec{x};NW\rangle\langle\vec{x};NW| = \int \frac{d^3p}{(2\pi\hbar)^3} |f(\vec{p})|^2\ |\vec{p}\rangle\langle\vec{p}|$$

کامل بودن $\leftarrow$ $f(\vec{p}) = \frac{1}{\sqrt{2E_p}}$

$$\langle\vec{x};NW|\vec{x}';NW\rangle = \int \frac{d^3p}{(2\pi\hbar)^3} (2E_p)|f(\vec{p})|^2 e^{i\vec{p}\cdot(\vec{x}-\vec{x}')/\hbar}$$

تقارن $\leftarrow$ $f(\vec{p}) = \frac{1}{\sqrt{2E_p}}$

• $|\vec{x},NW\rangle$ کامل و متقارن است ولی نادرستی لورنتس نیست.

ذره جایگزیده در یک چارچوب
در چارچوب دیگر جایگزیده نیست.

$$|\psi;t=0\rangle = |\vec{x},NW\rangle \rightarrow |\psi;t=\epsilon\rangle = \int \frac{d^3p}{(2\pi\hbar)^3} \frac{1}{\sqrt{2E_p}} e^{-i\vec{p}\cdot\vec{x}/\hbar} e^{-iE_p\epsilon/\hbar} |\vec{p}\rangle$$

$$\langle\vec{x}';NW|\psi;t=\epsilon\rangle = \int \frac{d^3p}{(2\pi\hbar)^3} e^{i\vec{p}\cdot(\vec{x}-\vec{x}')/\hbar} e^{-iE_p\epsilon/\hbar}$$

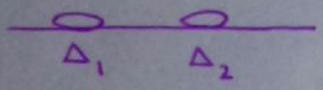
$\neq 0$ حتی وقتی که $\vec{x}, \vec{x}'$ بسیار دور از هم باشند. با گذر کوچکترین زمانی پس شدگی زیادی داریم.

Scanned by CamScanner

* قضیه مالامنت :

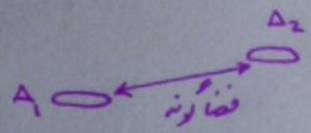
اگر

۱- جایگزیدگی $P_{\Delta_1} P_{\Delta_2} = P_{\Delta_2} P_{\Delta_1} = 0$



۲- ناوردایی انتقال $P_{\Delta+a} = U(a) P_{\Delta} U(-a)$

۳- محدود بودن انرژی از پائین



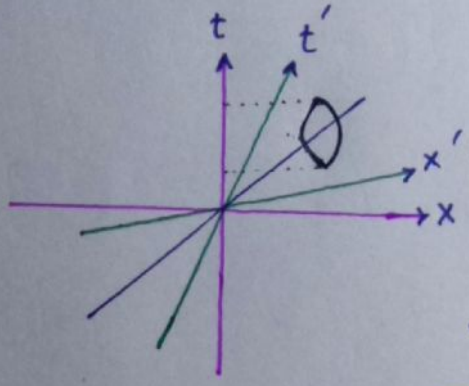
۴- ریزعلیت $[P_{\Delta_1}, P_{\Delta_2}] = 0$

داشته باشیم، آنگاه $P_{\Delta} = 0$

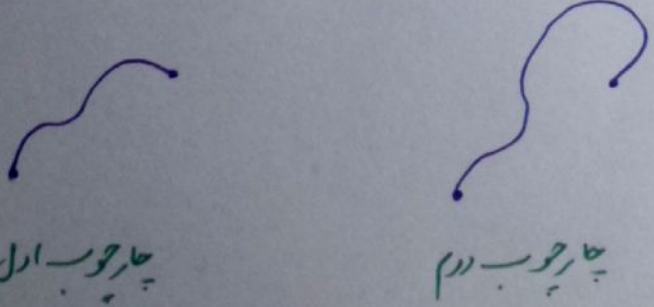
- بنابراین جایگزیدگی با ترکیب انتقال و علیت نسبیتی سازگار نمی باشد.
- برای جرم صفرها مانند فوتون حالت $|\vec{x}; NW\rangle$ فاکتور $\frac{1}{\sqrt{P}}$ پیدا می کند که انتگرال مربوطه را بدتعریف می کند و ذرات بدون جرم جایگزیده نمی شوند.

مکانیک کوانتومی نسبیتی در دیدگاه مرسوم به بن بست می رسد، اما ذرات مجنون

مانیمن مجنون ترمی شوند:



- ذراتی که در زمان عقب می روند و یا پاد ذره



چارچوب اول — چارچوب دوم

Scanned by CamScanner

$$\langle \vec{x}_1;R|\, e^{-iHt/\hbar}\, |\vec{x}_2;R\rangle \longrightarrow \int Dx\, e^{iS/\hbar}$$

$$\downarrow$$

$$\frac{e^{-iEt/\hbar}\; e^{i\vec{p}\cdot\vec{x}/\hbar}}{E}$$

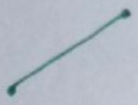
$$\phi = -\sqrt{p^2+m^2}\; t/\hbar + \vec{p}\cdot\vec{x}/\hbar$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial p_i} = 0 \Rightarrow \vec{p} = \mathcal{E}\frac{\vec{x}}{t} = m\gamma\vec{v}$$

$$\phi = -\frac{\mathcal{E}t}{\hbar} + \frac{\mathcal{E}}{\hbar}\vec{v}\cdot\vec{x} = -\frac{m\tau}{\hbar}$$

$$\downarrow$$

$$\frac{e^{-im\tau/\hbar}}{\mathcal{E}} \sim$$



• $|\vec{x},R\rangle$ را معنی مستقیمی نداشت.

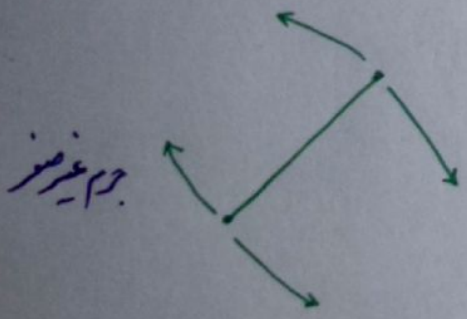
$$|I\rangle = \int \frac{d^3p}{(2\pi\hbar)^3}\frac{1}{2E_p}\,|\vec{p}\rangle\langle\vec{p}|I\rangle$$

• بسته موج:

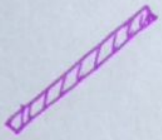
$$\langle\vec{p}|I\rangle = g_I(\vec{p}-\vec{\pi}) = A\sqrt{2E_p}\, e^{-\alpha(\vec{p}-\vec{\pi})^2}\, e^{-i(\vec{p}-\vec{\pi})\cdot\vec{x}_I/\hbar}$$

$$\langle\vec{x};NW|I\rangle = B\, e^{i\vec{\pi}\cdot\vec{x}/\hbar}\, e^{-\frac{1}{\alpha}(\vec{x}-\vec{x}_I)^2} \longleftarrow \text{جایگزیده حول } \vec{x}_I$$

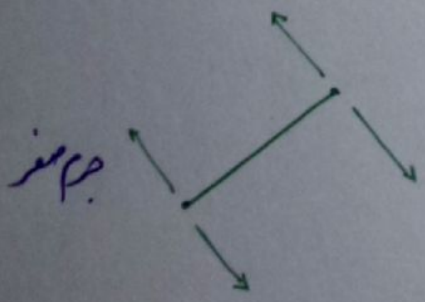
$$\langle F|\, e^{-iHt/\hbar}\, |I\rangle \sim e^{-i\mathcal{E}t/\hbar}$$



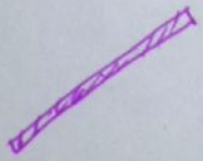
$$\frac{e^{-im\tau/\hbar}}{\mathcal{E}}$$



$$e^{-i\mathcal{E}t/\hbar}$$



$$\frac{1}{\mathcal{E}}$$



$$e^{-i\mathcal{E}t/\hbar}$$

• بسته موج برای فوتون همان مشکل $\frac{1}{\sqrt{p}}$ را دارد.

• ریشه این مشکل و دگرایی ترمزگیری است که با باز بهنجارش حل می‌شود.

Scanned by CamScanner

• تقارن پیمانه‌ای ⟵ برهم‌کنش

• ذرات مجذول مایخ آنچنان مجنونند که هر مسیری را طی می‌کنند، در زمان جلو و عقب می‌روند.
آنچنان مجنونند که اگر در مکان $\vec{x}$ خلقشان کنیم ($|\vec{x}>$) و بعد آنا بیازمائیم که در کی خلقشان کرده‌ایم ممکن است در هرجا باشند! $<\vec{x}'|\vec{x}> \neq 0$!!!

اما اگر با دقتی محدود در مکانی قرارشان دهیم دامنه احتمال گذارشان همیشه e^{-iEt} می‌باشد. چه در حالت غیرنسبیتی، چه در حالت نسبیتی جرمدار و چه در حالت نسبیتی بدون جرم مسیرهای ممکنه آنچنان درهم می‌آمیزند که حاصل یکی شود: e^{-iEt}

به نظری رسد مایخ ذرات مجنونش را چنین می‌نهد

• یک سؤال اساسی: اگر جایگزیدگی در ترکیب فیزیک کوانتومی و فیزیک نسبیتی امکانپذیر نیست و اگر مکانیک کوانتومی جهان شمول است، آنوقت اصولاً معنی ناظرها و تبدیلات پوآنکاره دچار مشکل می‌شود.

• یک سؤال اساسی دیگر: اگر جایگزیدگی نداریم، چگونه نتیجه مشاهده را ثبت کنیم. خطوط دفتر یادداشت فیزیکدان تجربی جایگزیده نیستند.

⇓

مسئله حد کلاسیک زنده می‌شود.

Scanned by CamScanner

ب-۲ تقارن پوآنکاره + واقعیت کوانتومی تام ← نظریه میدان کوانتومی نسبیتی

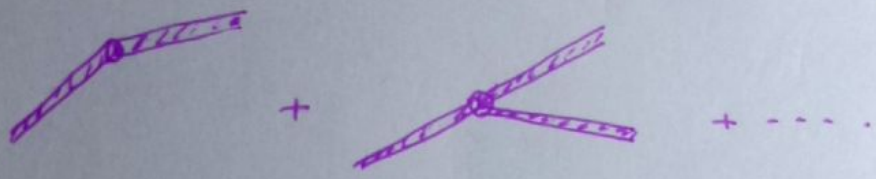
- زمان منظور نظر نیست بنابدلایل تکنیکی ← مشاهده پذیر ساعت

- مکان منظور نظر است گرچه تقارن پوآنکاره را نمی بیند. !!

- تعداد ذرات منظور نظر است : $\sum_n |n\rangle\langle n| = \mathbb{1}_{number}$

• تشخص ← تشخص تمیز ناپذیر

• تقارن پیمانه‌ای ← برهمکنش ←



بدینگونه هستی شناسی ذرات مجزا و تمیز تکمیل می شود.

• هستی شناسی میدان :

- تشخص ذره‌ای ← هویت میدانی

- جایگزیدگی هنگام نظر ← عدم جایگزیدگی

- برخلاف حالت غیرنسبیتی که هستی شناسی میدان دلخواه بود، در اینجا می تواند راه حلی برای فرار از مشکل جایگزیدگی در هنگام نظر باشد.

- اما این راه حل به قیمت شکستن ارتباط با توصیف معمول آزمایش‌های ذره‌ای می شود.

- معنی $\hat{\phi}(\vec{x})|0\rangle = |\vec{x}\rangle$ چیست اگر $|\vec{x}\rangle$ حالت موقعیت نیست؟ + قضیه هاگ

- هزینه، توصیف بسیار انتزاعی مشاهدات است.

Scanned by CamScanner

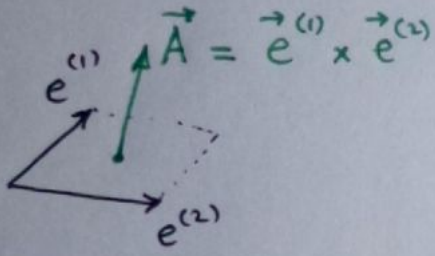
ج- تقارن عام مختصات + واقعیت کوانتومی

- مسئله اندازه انتگرال در هستی شناسی ذرات مجنون
- مسئله خلاء و اثر آنرو ← عدم شمارش پذیری

- زمان منظور نظر نیست.
- مکان منظور نظر نیست.

← فضا-زمان اصلا نیست. ← کف فضا-زمان

گرانش ≡ چرخش متفاوت محورهای ناظرهای موضعی ← گروه SU(2) ← SU(2) پیمانه ای



$$[A^i, A^j] = i l_0^2 \epsilon^{ij}{}_k A^k$$

$$l_0^2 = 8\pi\gamma l_p^2$$

$$|A| = l_0^2 \sqrt{j(j+1)}$$

$$V^2 = \alpha \epsilon_{ijk} A_1^i A_2^j A_3^k$$

$$\Rightarrow V \propto l_0^3$$

- مسئله ویژه مقداری سطح :
- مسئله ویژه مقداری حجم :

$1\,cm^3 \propto 10^{100}$ quanta

شبکه اسپینی ← کف فضا-زمان

• برنامه گرانش کوانتومی : "رخداد" داریم نه رخداد در فضا-زمان

- ذره چیست؟ میدان چیست؟

برنامه ای دلچسب ولی انجام نشده

Scanned by CamScanner

- هستی شناسی ذرات بنیادی
- هستی شناسی میدان
- سایر دیدگاه‌ها: - تعبیر S-Matrix و یا VEV
  - تعبیر Wave Functional
- مسائل غیر اختلالی
- تبدیلات عام مختصات

ما واقعاً راجع به چه موجوداتی صحبت می‌کنیم؟

Scanned by CamScanner